



TITLE:

岩盤内の初期地圧状態に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

石田, 毅

CITATION:

石田, 毅. 岩盤内の初期地圧状態に関する研究. 京都大学, 1989, 工学博士

ISSUE DATE:

1989-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r6832>

RIGHT:

新 制

工

767

京大附図

岩盤内の初期地圧状態に関する研究

昭和63年11月

石 田 毅

岩盤内の初期地圧状態に関する研究

昭和 63 年 11 月

石 田 毅

目次

第1章． 緒論	1
1. 1. 本研究の目的	1
1. 2 初期地圧測定法に関する従来の研究	2
1. 2. 1. 種々の初期地圧測定法	2
1. 2. 2. 高い地圧場における初期地圧推定法	6
1. 2. 3 我が国で実績のある初期地圧測定法	8
1. 3. 初期地圧状態に関する従来の研究	11
1. 3. 1. 従来の理論的な研究	11
1. 3. 2. 実測結果に基づく研究	14
1. 3. 3. 初期地圧状態に影響を及ぼす諸要因に関する研究	15
1. 4. 内容の概観	17
第2章． 高い地圧場における初期地圧推定法	25
2. 1. 緒言	25
2. 2. 高い地圧場における中空コアの破壊機構	27
2. 2. 1. 中空コアのコアディスキング現象の特徴	27
2. 2. 2. ボーリング刃先付近の応力状態	28
2. 2. 3. コア長さと内外径比の影響	33
2. 3 中空コアのコアディスキング現象が発生する地圧条件	38
2. 3. 1 理論解析により求めた発生条件と実験結果の比較	39
2. 3. 2 コアディスキング現象発生箇所における地圧状態の実測	40
2. 4. 結言	45
第3章． 初期地圧の測定例とその結果に見られる特徴的な傾向	48
3. 1. 緒言	48
3. 2. 大きな水平地圧の存在が認められる初期地圧測定結果	49
3. 2. 1 佐々連鉱山における測定例	49

3. 2. 2. A地下発電所における測定例	58
3. 3. 初期地圧測定結果と地形との関連	61
3. 3. 1. 関越トンネルにおける測定例	62
3. 3. 2. 明延鉱山における測定例	65
3. 3. 3. 平木鉱山における測定例	71
3. 4. 結言	74
第4章. 実測結果に基づく初期地圧状態の一般的傾向	77
4. 1. 緒言	77
4. 2. 主応力方向の鉛直軸からの傾き	79
4. 3. 鉛直地圧と測定深度の関係	80
4. 4. 平均水平地圧と測定深度の関係	81
4. 5. 最大 最小水平地圧及び最大せん断応力と測定深度の関係	83
4. 6. 結言	85
第5章. 初期地圧状態に影響を及ぼす諸要因に関する検討	88
5. 1. 緒言	88
5. 2. 造構応力	88
5. 3. 地形	94
5. 4. 岩盤の不均質性	99
5. 5. 岩盤の粘弾性的性質	107
5. 6. 残留応力	110
5. 7. 初期地圧状態の予測法の提案	112
5. 8. 結言	116
第6章. 結論	121
謝辞	124

第 1 章 緒 論

1. 1. 本研究の目的

我が国の鉱山や炭鉱では、年々その採掘深度が深くなり、これに伴って、山はねやガス突出などの岩盤の異常な破壊現象が発生するようになり、これらの現象の予知および防止は深部地下資源を安全に開発する上で重要な問題となっている。また近年、地下水力発電所、石油地下備蓄庫および山岳トンネルはもちろん、地下式原子力発電所や高レベル放射性廃棄物の地層処分が検討されるなど、深部地下空間の有効利用に対する社会的必要性はますます増大している。さらに高温岩体とよばれる地下深部の地熱エネルギーも、重要な地下資源のひとつとしてその開発が非常に注目されるようになってきている。

このような地下資源開発や深部地下空間の有効利用の合理的かつ安全な設計や施工にあたって、岩盤内の応力状態を正確に把握することは非常に重要なことである。岩盤内の応力状態は、初期地圧、1次地圧あるいは地山応力とよばれる空洞開削前の応力状態と、2次地圧とよばれる空洞開削によって生じた応力再配置後の応力状態に分類され、さらには支保工に作用する地圧は3次地圧とよばれて区別される場合もある。これらのうち、特に初期地圧状態は、地下資源の安全開発や地下深部の構造物の安定性に大きな影響を与えるので、事前にその状態を正確に把握して採掘計画や工事設計に反映させることが望ましい。

初期地圧状態の測定法については、すでに種々の方法が開発され、各種地下空洞の開削に際して初期地圧状態が実測される機会も増大してきている。しかし、初期地圧状態の把握が最も必要とされる地下深部の高い地圧場では、ボーリングコアやボーリング孔の破壊のために、従来開発されてきた測定法の適用が困難な場合があり、このような高い地圧場における初期地圧推定法の開発が必要とされている。また、日本列島は地震活動をはじめとする地殻変動が活発な地域にあり、その初期地圧状態は諸外国に比べて特異な傾向を示す可能性があるが、我が国の初期地圧状態の一般的な傾向やこれに影響を与える諸要因に関する研究は必ずしも十分に行われているとは言えない。このように、岩盤内の初期地圧状態に関しては、いくつかの重要な研究課題が残されている。そこ

で筆者は、これらの課題を解決するための基礎資料を得ることを目的として、本研究を行うことにし、まず未だ適切な方法が開発されていない高い地圧場における初期地圧の推定法について検討を行った。ついで筆者が実際に測定を行った5箇所9地点の初期地圧測定例を測定箇所毎に個別に考察するとともに、日本各地の41地点において実施された信頼性の高い初期地圧測定結果に基づいて、我が国の初期地圧状態の一般的傾向を検討した。さらに初期地圧状態に影響を与える種々の要因について考察を加え、これらを本論文に取りまとめた。

1. 2 初期地圧測定法に関する従来の研究

初期地圧状態に関する研究を進めるための、最も確実で基本的な方法は、十分な精度を有する信頼性の高い方法で初期地圧を実測し、その結果に基づいて議論を行うことである。一方、地質構造にもよるが地下1000m程度以深の地下深部では、ボーリング孔の孔壁が破壊したりコアの破壊が生じることがあり、このような高い地圧場では、従来から用いられてきている方法による測定が困難である。しかし、このような場所では通常の場合以上に初期地圧状態の把握が重要であるから、なんらかの工夫によりその推定を行うことが必要である。そこで、ここでは今日までに開発されてきた種々の初期地圧測定法を整理するとともに、近年地下空洞の深部化に伴い必要性が増大してきた高い地圧場での初期地圧推定法の研究の可能性を検討する。また、本研究において初期地圧状態を分析するために用いた我が国の代表的な2つの測定法については、具体的にその内容を紹介する。

1. 2. 1 種々の初期地圧測定法

初期地圧の測定法については、古くから多くの研究者により活発な研究が行われ、種々の方法が提案されてきている。これらを測定原理に基づいて分類すると、応力補償法、応力解放法、水圧破碎法、その他の方法の4つに分類することができる。これらのうち、応力補償法は歴史的には重要な方法であるが、3次元的な初期地圧状態を決定するためには非常に多くの回数の測定を必要と

し、また岩盤表面付近でしか測定ができないため測定精度上も問題があり、現在では初期地圧測定法としてはほとんど用いられていない。そこで以下では、これを除いた3つの方法について述べることにする。

(i) 応力解放法

応力解放法は、地圧を受けてひずみが生じている岩盤の一部をボーリングにより応力解放し、このときのひずみの変化量から岩盤内の応力を推定する方法である。この方法は、ボアホール内のひずみ測定を行う位置の違いにより、孔底ひずみ法、孔壁ひずみ法、孔径変化法、埋設型ゲージを用いる方法の4つに分類される。

孔底ひずみ法は、ボアホール底面を研磨し、その中央にひずみゲージを貼付し、そのゲージの抵抗値の初期値を読み取った後、ゲージ位置をオーバーコアリングすることにより、応力解放を行うものである。この方法は Leeman¹⁾がロゼットゲージを現場測定用にモールドした "Doorstopper" と呼ばれるゲージを開発したことにより実用化が進んだ。その後、岡ら²⁾や亀岡³⁾はこの方法を改良し、孔底面で一度に8成分のひずみを測定できる8素子ゲージを開発して、測定法の簡素化と精度の向上をはかり、我が国で多くの測定実績をあげている。また最近では、菅原ら⁴⁾⁵⁾が孔底面を球面に整形し16素子のモールドゲージを貼付する球面孔底ひずみ法を提案している。

孔壁ひずみ法は、測定用小口径ボアホール壁面の1断面内の3箇所にロゼットゲージを貼付し、大口径ボーリングによって応力解放したときのひずみの変化量より岩盤内応力を決定するものである。孔壁の仕上げや孔壁にロゼットゲージを貼付する技術が難しいが、最近 Hiltischer⁶⁾らにより、地表から鉛直下向きに穿孔したボアホールを利用し、深度300mまでの測定に成功したとの報告がなされている。

孔径変化法は、応力解放前後のボアホールの直径変化量から岩盤内応力を決定する方法で、南アフリカ共和国の国立機械工学研究所(CSIR)で開発されたCSIR-I⁷⁾型、CSIR-II⁸⁾型や、アメリカ鉱山局(USBM)で開発されたUSBM⁹⁾型がよく知られている。また、我が国では鈴木¹⁰⁾がUSBM型に

似た方法を開発し、実用に供されている。

埋設型ゲージを用いる方法は、ボアホール内にセメントミルクや合成樹脂で多成分のゲージを埋設し、充填剤の養生固結後オーバーコアリングを行い、応力解放にともなうボアホールの変形を計測する方法である。電力中央研究所の金川らは、¹¹⁾¹²⁾変位計を内蔵した中空円筒型の埋設型ゲージを開発して我が国で多数の測定実績をあげ、また Worotnicki¹³⁾らや Rocha¹⁴⁾らもそれぞれCSIR-O型、LNEC型とよばれる中空円筒型の埋設型ゲージを開発している。これらはいずれもゲージ自体には剛性が全くないか、あってもごくわずかなものである。これに対し、ゲージ自体が非常に大きな剛性をもつか、あるいは周囲の岩盤と同じ程度の剛性をもつ、いわゆる「かたい」ゲージが、Blackwood¹⁵⁾らや Rocha¹⁶⁾らによって開発されている。これらの種々の埋設型ゲージにはそれぞれの特徴と測定実績があり、一概にどのゲージがどのような種類の岩盤に適するとは言えず、それぞれの研究者が自分の開発したゲージを用いて工夫と改良を繰り返しながら測定を行っているのが現状である。

(ii) 水圧破碎法

水圧破碎 (Hydraulic Fracturing) は、自噴作用の衰退した採油井をとおして含油層に亀裂を発生させ、石油の増産をはかる手法として発達してきたが、これを初期地圧状態の測定法として利用する研究が、Fairhurst,¹⁷⁾Haimson,¹⁸⁾¹⁹⁾Zoback,²⁰⁾塚原²¹⁾らにより進められ現在では広く実用に供されている。この方法は原理的には測定深度に限度がなく、地表から地下深部の地圧を測定するのに適しており、5000mを越える深さでの測定例も報告されている。¹⁸⁾従来、この方法ではボアホール軸方向が一つの主応力方向であると仮定され、ボーリング軸に直交する2次元平面での応力状態しか推定できなかったが、水田²²⁾らや厨川²³⁾らが、3本以上のボアホールを用いて3次元的な地圧状態を求める水圧破碎法を提案し、検討を進めている。また最近では、高温岩体の地熱開発における熱交換面の造成法として水圧破碎が注目され、これに関連して初期地圧測定も盛んに行われている。

(iii) その他の方法

以上に述べた測定法以外で実用化の段階に入っている初期地圧測定法としては、微小破壊音頻度法 (Acoustic Emission法: AE法と略称) と変形率変化法 (Differential Strain Curve Analysis) をあげることができる。

AE法とは、物体内部にマイクロクラックが発生したり、潜在するマイクロクラックが伸張するときに発生する微小な音 (Acoustic Emission) を測定し、この発生状態から初期地圧を求めようとする方法である。岩石試料に応力を加えていくと試料内部の応力が、すでに受けた応力履歴の最大レベルに達するまでは比較的AEの発生が少なく、応力がそれ以上になるとAEの発生が急に激しくなることが確かめられている。この効果はカイザー (Kaiser) 効果といわれているが、AE法はこれを利用して、測定場所から採取した岩石コアを加圧しながらAE頻度の急増点を見だし、初期地圧のレベルを求める方法である。具体的には、測定地点のボーリングコアを実験室に持ち帰り、いくつかの異なった方位にコアを切り出し、供試体を作製する。次に、各供試体を一軸載荷し、AE頻度の急増点の荷重を求めれば、この荷重が初期地圧のうち²⁴⁾²⁵⁾で供試体の方位に一致する直応力成分を与える。AE法を最初に開発した金川は、すでに多くの測定実績をあげているが、最近では相異なる6方向の供試体について上記の試験を行い、完全な3次元状態の初期地圧を決定している。しかし、この方法には測定値が試料採取地点の過去の最大地圧を示す可能性があることや、3次元的な応力状態がAEの急増点に影響を与えるかどうかなど、未解明の問題が残されており、最近では、試料採取後時間が経過すると測定値²⁶⁾が試料採取時の地圧より小さい値を示す傾向があるとの指摘もなされている。この点、ボアホールジャッキを用い、原位置のボーリング孔内で計測を行う試み²⁷⁾は、今後の研究の方向として注目すべきであろう。

変形率変化法は、AE法と似ているが、AEのかわりに岩石コアの変形率に着目する点に特徴がある。すなわち、測定地点から採取したコアを整形し圧縮荷重を加えていくと、応力が初期地圧レベルを越えた時点から新たなクラックが発生するため、それ以後の供試体の変形率はそれ以前と異なる。この方法は、

この変形率の変化点から初期地圧を求める方法である。山本らは一軸圧縮試験²⁸⁾で、Ren²⁹⁾は静水圧試験でこの方法を検討し、初期地圧測定法として有望であることを報告しており、今後の発展が期待される。しかし、測定値が試料採取時の地圧状態を常に示すものかどうか、また3次元的な応力状態が変形率の変化点に影響を与えるかどうかなど、A E法と同様の問題が残されている。

1. 2. 2. 高い地圧場における初期地圧推定法

我が国の鉱山では年々その採掘深度が深くなり、山はねやガス突出など、岩盤の異常な破壊現象が発生するようになってきている。また、山岳トンネルなど、土木構造物が地下深部に掘削される場合もしばしばみられ、このような地下深部の高い地圧場において初期地圧状態を把握する必要性が増大している。しかし、地質構造にもよるが地下1000m程度以深では、ボーリング孔の孔壁が崩壊したり、コアがボーリング軸と直角に一定の厚さに割れて採取される、いわゆるコアディスキング現象が発生することがしばしばあり、このような場合には通常用いられている初期地圧測定法の適用が困難となる。例えば、孔壁ひずみ法や埋設型ゲージを用いる応力解放法では、ゲージの設置が困難となり、できたとしてもオーバーコアリングの際にゲージが損傷をうける。孔底ひずみ法や孔径変化法の場合も、やはりオーバーコアリングの際のコアの破壊のため安定した測定値を得ることが難しい。A E法や変形率変化法についていえば、供試体として用いることのできるような連続したコアを採取することが難しく、たとえコアの採取ができて、測定しようとする初期地圧の大きさが岩石の圧縮強度に近くなると、破壊による挙動がA Eや変形率の変化に重畳するため測定が困難となる。水圧破碎法は地下深部の高い地圧場の測定に比較的適する方法と思われるが、孔壁が崩壊したボーリング孔にパッカーを確実に設置するための工夫や、測定値の解釈についての十分な検討はあまり行われていない。このように地下深部の高い地圧場においては、すでに開発されている種々の初期地圧測定法をそのまま適用することが困難である。しかし、高い地圧場においては通常の場合以上に初期地圧状態の評価が重要であり、従来の測定法と観点

の異なる新たな初期地圧推定法の開発が必要と考えられる。

このような条件を満たす方法として、冒頭に述べたコアディスキング現象を、初期地圧測定妨害要因ととらえず、逆にこの現象を積極的に利用して初期地圧状態の推定を行うことが考えられる。すなわち、コアディスキング現象は地圧によるボーリングビット刃先付近の応力集中により発生するものと思われるから、その発生条件を明らかにすれば、コアボーリングを行うだけで地圧状態を推定することができる。

コアディスキング現象に関する最初の研究として、³⁰⁾ Bridgman による金属とガラスの周圧下の破壊挙動に関する実験的研究を挙げることができるが、岩石におけるコアディスキング現象を最初に検討したのは ³¹⁾ Jaeger らである。すなわち、円柱形供試体の中心軸に沿って小口径のコアボーリングを行い、内部にコアを残した状態で円柱形供試体に油圧で周圧を加え、内部に残したコアが分離する条件を検討した。その後、³²⁾ Obert らは供試体に周圧と軸圧を載荷したまま供試体にコアボーリングのできる装置を考案し、コアディスキング現象の発生する周圧と軸圧との関係を実験的に調べた。さらに、³³⁾ Durelli らはコアディスキング現象の発生条件に関する実験とともに3次元の光弾性試験を行い、コアディスキング現象が起こる原因は、ビットのあたる部分に発生する圧縮応力の集中にあると推定した。一方、³⁴⁾ 菅原らは、有限要素法を用いた詳細な応力解析を行い、コアディスキング現象は、コアの根元付近に発生するボーリング軸方向の引張応力に起因するとの考えを示し、自ら行った実験の結果や Obert らの一連の実験結果を矛盾なく説明できることを示した。このコアディスキング現象がコアの根元付近の引張応力に起因するとの考えかたは、その後 ³⁵⁾ Stacey も同様の見解を示している。最近では、³⁶⁾ 小林らが、圧縮強度の小さい、いわゆる軟岩中におけるコアディスキング現象の発生の可能性を検討するため、³²⁾ Obert らの装置に類似した実験装置を製作し、セメント・モルタルを供試体として、種々の封圧下でボーリング試験を行い、その結果を圧縮強度の高い砂岩に対する結果と比較している。この結果によれば、圧縮強度が低い軟岩の場合には、³³⁾ Durelli らが指摘するようにせん断破壊によりコアディスキング現象

が発生するが、圧縮強度の高い硬岩の場合には菅原らの指摘するように、コアの根元付近に発生するボーリング軸方向の引張応力に起因する可能性が高い。

以上に述べたのは、通常のコアのコアディスクリング現象に関する従来の研究であるが、初期地圧測定オーバーコアリングの際に得られるような中空コアについてもコアディスクリング現象が発生することが知られている。中空コアの場合には、中空コアの口径や肉厚を変化させることにより、コアディスクリング現象の発生をある程度制御できると思われるから、初期地圧状態の推定法としては通常のコアのコアディスクリング現象よりも一層有効と思われる。このような中空コアのコアディスクリング現象については、Jaeger³¹⁾ら、Obert³²⁾ら、菅原³⁴⁾やStacey³⁵⁾がいずれも言及し研究の必要性を述べているものの詳細な検討は未だなされていない。

1 2 3 我が国で実績のある初期地圧測定法

初期地圧状態に関する研究を進めるためには、十分な精度を有する信頼性の高い方法で3次元的な初期地圧を実測し、その結果に基づいて議論を行うことが重要である。3次元的な初期地圧状態の測定という観点から、いままでに開発された種々の初期地圧測定法を比較すると、応力解放法が最も歴史が古く、測定実績も豊富で信頼性が高い。我が国で10年以上の測定実績のある応力解放法は、岡ら²⁾や亀岡³⁾が開発した孔底ひずみ法、電力中央研究所の金川¹¹⁾らが開発した埋設型ゲージを用いる方法、鈴木¹⁰⁾が開発した孔径変化法の3種をあげることができる。本研究においては、これらのうち孔底ひずみ法を用いて日本各地の初期地圧測定を行い、その結果を各測定箇所毎に詳細に検討した。また、この孔底ひずみ法による測定結果に、埋設型ゲージを用いた測定結果を参考データとして加え、我が国の初期地圧状態の分析を行った。そこで、ここではこの2つの方法についてその概要を述べることにする。

岡²⁾らと亀岡³⁾が開発した孔底ひずみ法は、8枚のストレインゲージを埋め込んだ8素子ゲージと呼ばれる図1-1に示すゲージを、直径75mmの先進ボーリング孔の孔底に貼付した後、大口径ボーリングにより応力解放を行い孔底の

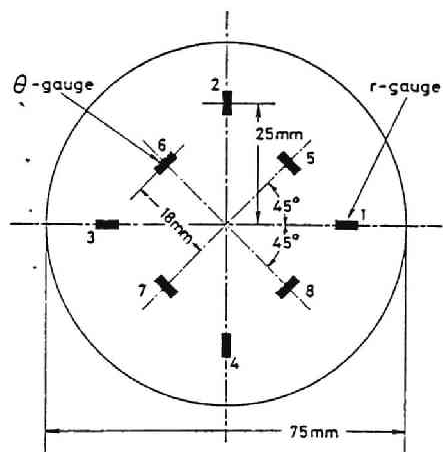


図 1-1. 8素子ゲージ³⁾

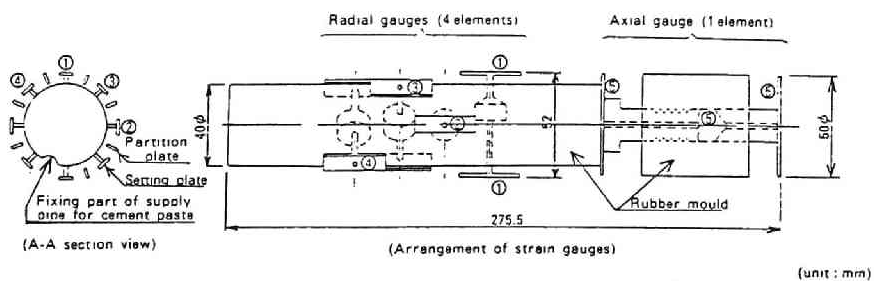
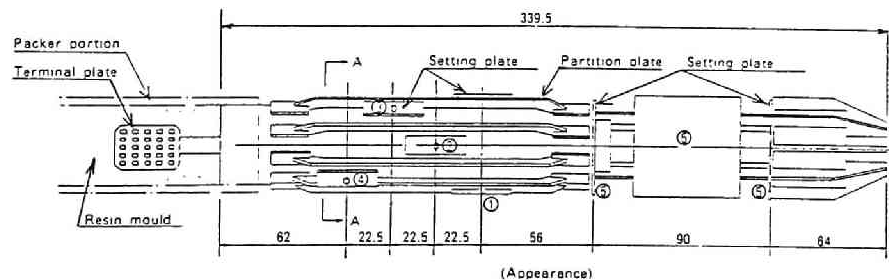


図 1-2. 電中研式埋設型ゲージ¹²⁾

ひずみの変化量を測定する方法である。理論的には1本のボアホールでの1回の測定で初期地圧を決定できるが、実際には精度向上のため方向の異なる2本以上のボアホールで数回の測定を行うのが普通である。観測方程式は、初期地圧を $\{\sigma\}$ 、原位置で応力解放時に実測されるひずみを $\{\epsilon\}$ 、ひずみ感度係数を $[B]$ とすると、

$$\{\epsilon\} = [B] \{\sigma\} \quad \text{-----} \quad (1-1)$$

で表される。 $\{\epsilon\}$ は測定ひずみの数を n とすると n 個の測定ひずみからなる列ベクトル、 $\{\sigma\}$ は独立な6応力成分からなる列ベクトル、 $[B]$ は $n \times 6$ のマトリックスである。初期地圧は(1-1)式より、

$$\{\sigma\} = ([B]^T [B])^{-1} [B]^T \{\epsilon\} \quad \text{-----} \quad (1-2)$$

の形で与えられる。ここに、 T は転置行列を、 -1 は逆行列を示す。この方法では、ひずみ感度係数 $[B]$ を、 $[B] = [M]/E$ と分解して考える。ここに E は岩盤のヤング率であり、 $[M]$ は測定箇所に作用している初期地圧 $\{\sigma\}$ とボアホール孔底で測定される解放ひずみ $\{\epsilon\}$ とを対応付けるマトリックスである。 $[M]$ は岩盤のポアソン比 ν により多少異なるため、幾つかの ν の値に対して有限要素法を用いた弾性解析によって求められている。岩盤のヤング率 E はポアソン比 ν とともに、測定コアの一部から切り出した直径30mm、長さ60mm程度の円柱コアの一軸圧縮試験で決定する。この方法は、岩質が均質・等方弾性体であるとの仮定に基づいて測定結果を取り扱うため、理論的に明解な方法といえる。

¹¹⁾¹²⁾
金川らが開発した埋設型ゲージを用いる方法は、図1-2に示す剛性の低いゲージを直径56mmの先進ボーリング孔にセメントミルクで埋設し、セメントミルクが固化した後オーバーコアリングを行い、解放ひずみを測定する方法である。このゲージは、ボーリング軸方向1成分と、ボーリング軸と直交する平面内に互いに45°の角度をなすように配置された孔径方向4成分を内蔵した4成分ゲージであり、初期地圧を決定するためには、方向の異なる3本のボアホールでの測定を必要とする。測定方程式は前述の8素子ゲージを用いた孔底ひずみ法と同じ(1-1)、(1-2)式で表されるが、この方法では、原

位置で解放ひずみを測定したコアをゲージを埋設したまま実験室に持ち帰り、これに油圧载荷による静水圧3軸試験を行って埋設ゲージの感度、すなわちひずみ感度係数〔B〕を求める。このため、ゲージの埋設状態、岩盤の異方性や微小亀裂の影響などを含んだひずみ感度係数を求めることができ、8素子ゲージを用いた孔底ひずみ法ほど理論的に明解ではないが、逆に実際的な方法といえる。

1. 3. 初期地圧状態に関する従来の研究

初期地圧状態に関する従来の研究としては、古典的な仮説やこれを発展させた地殻の応力状態に関する理論的な研究、あるいは実測結果に基づいて初期地圧の一般的傾向を明らかにしようとする試みなどがあり、また初期地圧に影響を及ぼすさまざまな要因に関する実際的なあるいは理論的な研究が進められている。そこで筆者は、これらの従来の研究を整理し展望することにする。

1. 3. 1. 従来の理論的な研究

初期地圧状態に関する古典的な説としては、Heimの説とKühnの説が代表的である。³⁷⁾ Heimの説とは、地下深部の地圧はあらゆる方向に同じ強さ、すなわち静水圧的であるとする説である。これは、地表からある程度以上深いところでは、岩盤の自重によって岩石の強さより高い圧力が作用し、岩石は結合力を失って破壊を伴わないで変形しうる性質、すなわち潜在塑性を呈しているとの考えに基づいている。しかし、地下深部の岩盤が差応力によって破壊され、地震が発生することを思えば、Heimの考え方は一般に受け入れ難い。一方、Kühnの説は、鉛直方向の直応力 σ_z は岩盤の自重に基づく圧力に等しく、また水平方向の直応力 σ_H は岩盤が弾性体であり、水平方向には伸び縮みできないと考えた場合に得られる関係に従う。すなわち、 ρ を岩盤の密度、 g を重力加速度、 h をかぶり深さ、 ν をポアソン比としたとき、 $\sigma_z = \rho g h$ 、 $\sigma_H = \rho g h \nu / (1 - \nu)$ であるとする説である。

Kühnの説は、岩盤を水平な地表をもつ半無限等方弾性体と仮定しているが、

この仮定は厳密には無理がある。重力場は地球の中心に向かっているのであり、地表は水平ではなく厳密には球面を形成している。この観点から、菅原³⁸⁾は、岩盤を球座標のもとに3次元的にとらえ、次のような考察を行っている。いま地球の中心を原点とする球座標 (r, θ, ϕ) における、半径方向の釣り合い式は次のようになる。

$$\begin{aligned} & \partial \sigma_r / \partial r + (\partial \tau_{r\phi} / \partial \phi) / (r \sin \theta) \\ & + (1/r) (\tau_{r\theta} / \partial \theta) \\ & + (2\sigma_r - \sigma_\phi - \sigma_\theta + \tau_{r\theta} \cot \theta) / r + F_r = 0 \quad (1-3) \end{aligned}$$

ここに、 F_r は体積力の r 方向成分である。さて、ここで初期地圧の鉛直方向の直応力成分 σ_r は岩盤の自重に基づく圧力 $F_r(R-r)$ に等しいと考えれば、 $(\partial \sigma_r / \partial r) + F_r = 0$ が成立する。ここに R は地球の半径である。さらに、地形の影響が無視できるか、あるいは地形が水平であるとき σ_r はひとつの主応力と見なせるから $\tau_{r\phi} = \tau_{r\theta} = 0$ と仮定できる。これらの関係を前述の釣り合い式に代入すると、結局、

$$2\sigma_r - \sigma_\phi - \sigma_\theta = 0 \quad \text{-----} (1-4)$$

となる。この関係は釣り合い式から導いた式であるから、岩盤の力学的性質によって変わることはない。従って地殻変動や地形の影響がないとき、岩盤の力学的性質とは無関係に、初期地圧の水平方向の直応力の平均値 $\sigma_H = (\sigma_\phi + \sigma_\theta) / 2$ と鉛直応力 σ_z との間に $\sigma_z = \sigma_H$ の関係が成立することを示している。この関係は、結果的に Heim の静水圧説に一致している点が興味深い。

一方、McCutchen³⁹⁾は、菅原と同様、地殻を自重のみの作用する球殻ととらえながら、やや異なった観点から水平地圧と鉛直地圧の比（側圧比）について以下のような議論を行っている。球座標における応力 ひずみ関係は岩盤のヤング率を E 、ポアソン比を ν とし、 $\sigma_\phi = \sigma_\theta$ と仮定すると図1-3を参照して、

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \partial u / \partial r = (\sigma_r - 2\nu \sigma_\theta) / E \\ \epsilon_\theta &= u / r = \{-\nu \sigma_r + (1-\nu) \sigma_\theta\} / E \end{aligned}$$

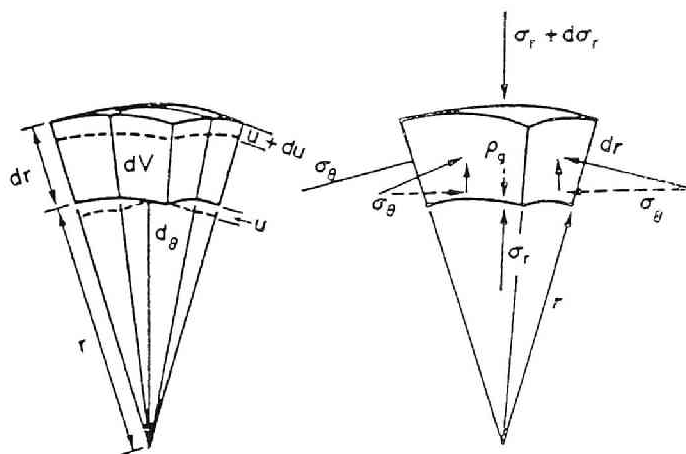


図1-3. 重力による球殻要素の変形と応力の釣り合い³⁹⁾

ここに、 u は半径 r 方向の変位である。上式を応力について書き直せば、

$$\begin{aligned}\sigma_r &= E \{ (1-\nu) \partial u / \partial r + 2\nu u / r \} / (1+\nu) (1-2\nu) \\ \sigma_\theta &= E (\nu \partial u / \partial r + u / r) / (1+\nu) (1-2\nu) \\ &\quad \dots \dots (1-6)\end{aligned}$$

側圧比 k は、 $\sigma_r = \sigma_z$ 、 $\sigma_\theta = \sigma_H$ であるから、(1-6)式より

$$\begin{aligned}k &= \sigma_H / \sigma_z = \sigma_\theta / \sigma_r \\ &= (\nu \partial u / \partial r + u / r) / \{ (1-\nu) \partial u / \partial r + 2\nu u / r \} \\ &\quad \dots \dots (1-7)\end{aligned}$$

と表せる。

さて、地表 $r=R$ においては $\sigma_r = 0$ だから、(1-6)式より、

$$(\partial u / \partial r)_R = (-2\nu / 1-\nu) (u/r)_R \quad \dots \dots (1-8)$$

となり、この式を用いて地表における σ_θ は、

$$\begin{aligned}(\sigma_\theta)_R &= \{ E (1-\nu-2\nu^2) / (1+\nu) (1-2\nu) (1-\nu) \} \\ &\quad \cdot (u/r)_R \\ &= \{ E / (1-\nu) \} (u/r)_R \quad \dots \dots (1-9)\end{aligned}$$

となる。もしいたるところで u/r が0であれば、半径方向ひずみ $\partial u / \partial r$ も0となり、自重による応力場が存在しないことになるから、一般に u/r

$\neq 0$ である。ゆえに、 $(\sigma_\theta) \neq 0$ 。従って、側圧比 k は地表部で分母が 0 となり、無限大となる。この結論は、地表近くで水平地圧が鉛直地圧より大きくなることを示唆している。(1-8) 式より、地表では半径方向ひずみ $\varepsilon_r = \partial u / \partial r$ と接線方向ひずみ $\varepsilon_\theta = u / r$ は正負が逆になっており、 ε_r は引張、 ε_θ は圧縮ひずみとなっている。しかし、深度が増加するにつれて ε_r は引張ひずみから圧縮ひずみに変化し、ついにはある深さ $r = r_1$ で $\varepsilon_r = \varepsilon_\theta$ 、すなわち $\partial u / \partial r = u / r$ となる。このとき、(1-7) 式より $k = 1$ となる。さらに深度が増加し、球殻の底部 $r = r_0$ では、 $u = 0$ 、すなわち (1-7) 式より、 $k = \nu / (1 - \nu)$ となり、Kühn の仮説から得られる式と一致する。上述の McCutchen の考え方は、側圧比の大きな測定結果の解釈に適しており、この点で他の 3 つの考え方と比較して特徴がある。

ここでは、初期地圧状態に関する従来の理論的な研究として、代表的な 4 つの仮説を概観した。古典的な Heim の仮説と Kühn の仮説を比較すると、地下深部の地圧は静水圧的であるとする Heim の仮説は、地下深部の岩盤が差応力によって破壊され地震が発生する事実や、静水圧状態を示す実測結果が少ないことから、一般に受け入れ難い。これに対し、水平圧が側方の変位拘束によって生じるとする Kühn の仮説は、実際の初期地圧状態に適合する場合もあるのではないと思われる。一方、しばしば測定される大きな水平地圧の存在は、これらの仮説では全く説明できず、菅原らや McCutchen の新しい考えかたを適用していく必要があろう。しかし、次に述べる実測結果に基づく研究から明らかのように、現状では統一的に初期地圧状態を説明できる有力な理論は見当たらず、このような理論的研究は、今後実測結果を蓄積し、それに基づいて発展させていくことが重要と思われる。

1. 3. 2. 実測結果に基づく研究

近年、各種地下空洞の開削がより地下深部で行われるようになるにつれ、世界各地で初期地圧測定がさかんに実施されるようになってきた。その結果はそ

それぞれの工学的問題を解決するために有効に利用されているが、これらの測定結果を整理し、初期地圧状態の一般的傾向を明らかにする試みも進められている。例えば McGarr⁴⁰⁾らは南アフリカ、北アメリカ、オーストラリアなど世界各地の測定結果を整理し、主応力方向が鉛直軸に一致することはむしろまれであり、その方向は広い範囲にばらつくことを指摘している。また Brown⁴¹⁾もこれらの地域の測定結果を整理し、大部分の地下構造物が存在する地下1000mより浅いところでは、水平方向の直応力 σ_H と鉛直方向の直応力 σ_z の比 σ_H/σ_z が1より大きいのが一般的であると述べている。さらに Ranalli⁴²⁾は、Hast⁴³⁾が行ったスカンジナビアの古い楕状地における測定結果と、Bulin⁴⁴⁾が行った中央アジアの卓状地の被覆堆積岩における測定結果を比較し、前者では大きな水平圧が見られるが、後者では水平圧が比較的小さく、このような違いは両者の地学的環境の差によるものであるとしている。これらの事実は、いずれも初期地圧状態が Heim の仮説や Kühn の仮説で示されるような単純なものではなく、Ranalli⁴²⁾が指摘した地域的な違いなどは、最近の菅原³⁸⁾や McCutchen³⁹⁾の理論でも十分説明できないことを示している。

我が国は、フィリピン海プレートと太平洋プレートが沈み込むユーラシアプレートの東縁に位置し、地震活動をはじめとする地殻変動が活発な地域である。従って、初期地圧状態は諸外国と比較して特異な傾向を有している可能性があり、正しく測定された実測結果に基づいて、初期地圧状態の評価を進めることが重要と思われる。我が国でも地下構造物の設計や施工に関して数多くの測定が行われており、初期地圧状態の一般的傾向を把握しようとする研究も試みられている。しかし、豊富なデータを用い、しかも測定地点毎の特徴とデータの信頼性を十分に把握して初期地圧状態の一般的傾向を明らかにすることは容易な作業ではなく、現状では必ずしも十分な研究が行われているとはいえない。

1. 3. 3. 初期地圧状態に影響を及ぼす諸要因に関する研究

初期地圧状態に影響を及ぼす要因としては、造構応力、地形、岩盤の不均質性などが考えられ、また岩盤の粘弾性的性質や残留応力なども影響を及ぼすも

のと考えられる。これらの諸要因の影響に関しては、ある程度研究が進められその成果も報告されているので、以下では各要因毎に従来の研究を整理して検討する。

造構応力は、断層活動やしゅう曲など地殻構造形成に関する力に対応する応力であり、しばしば地殻応力とも呼ばれる。このような応力が地下構造物の安定性に影響を与えることは比較的はやくから予想されていた⁴⁵⁾。しかし、初期地圧状態と造構応力との関連について本格的に研究が進められるようになったのは、測定法が確立され信頼できる初期地圧測定結果が得られるようになってからであり、我が国では1974年に発表された平松らの研究が最初のものと思われる。彼らは、地表下200～300mにおける初期地圧測定結果にみられる最大水平地圧の方向が地学的方法によって推定されるその地域の造構応力の方向に一致すると報告したが、その後 Haimson¹⁹⁾も、地表の地形の影響が及んでいるのは地表下わずか30mまでであり、それより深いところでは造構応力の影響が支配的であるとの測定例を示している。一方、最近では特に地震予知に関連した地球物理学の分野において、初期地圧測定結果からその地域の造構応力の状態を把握しようとする試みが報告されている⁴⁷⁾⁴⁸⁾。これらの研究結果から、造構応力は初期地圧状態に大きな影響を与えている可能性が大きく、地下構造物の安定性評価などを目的とする工学的立場からも、その影響の程度を明らかにしていく必要があると思われる。

地形は、初期地圧状態に影響を与える最も重要な要因であると従来から考えられており、古くは光弾性実験により基礎的な検討がなされている⁴⁹⁾。有限要素法の発達と普及にともない2次元断面での地形の影響の解析は容易に行えるようになったが、最近では地形の影響の評価を3次元有限要素法を用いて行う提案や、種々の数学的手法を導入して解析しようとする試みも報告されている⁵⁰⁾⁵¹⁾⁵²⁾。しかし、初期地圧状態の評価・予測を目的として、地形の影響を定量的に解析し整理検討した研究は必ずしも十分ではない。

岩盤の不均質性は、大断層や地質構造などに支配される地殻の規模の不均質性から、地下構造物周辺岩盤内の断層・節理あるいは地質・岩質の分布などに

支配される小規模なものまでさまざまである。このうち大規模な地質構造線周辺の初期地圧状態については、地震予知に関連して特に米国のSan Andreas断層周辺地域の研究が進められている^{53)~55)}。しかし、このような大規模な構造線周辺の初期地圧状態の一般的な傾向を把握することは容易ではなく、現状では調査対象地域の特徴を理解するにとどまっている。一方、工学的には地下構造物の建設に関連する小さい規模での岩盤内の岩質・地質の分布や断層・節理の存在が問題であり、このような岩盤の不均質性が初期地圧状態にどのような影響を及ぼすかを評価することが重要と思われる。しかし、このような問題に関する研究は部分的に散見される程度であり、今後の研究課題として残されているのが現状である。⁵⁶⁾⁵⁷⁾

岩盤の粘弾性的性質の影響については解析的な研究の試みが、また残留応力⁵⁸⁾についてはその評価の必要性の指摘や評価手法の提案が行われているものの、⁵⁹⁾必ずしも十分な研究が行われているとはいえない。⁵⁶⁾

1 4 内容の概観

本論文は6章からなり、第1章は緒論で、本研究の目的、初期地圧測定法と初期地圧状態に関する従来の研究ならびに本論文の概要について述べている。

第2章では、未だ適切な方法が開発されていない高い地圧場における初期地圧状態の推定法について検討を行う。高い地圧が作用している地下深部の初期地圧状態の把握は、地下空洞の安定性を評価するうえで特に重要であるが、このような箇所ではコアボーリングを行うと、ボーリングコアが円板状に規則正しく割れる現象（コアディスキング現象）やボーリング孔の孔壁が地圧によって崩壊するなどの現象にしばしば遭遇し、従来の方法では初期地圧状態の推定が困難な場合が少なくない。そこで逆にこのような破壊現象を利用して初期地圧状態を推定することを考えた。これらの破壊現象のうち、コアディスキング現象はボーリングコアビットの刃先部分の応力集中により発生するものと思われるから、その発生条件を明らかにすれば、コアボーリングを行うだけで簡単に地圧状態を推定することができる。特に小口径の先進ボーリング孔の周囲を大

口径のコアビットでオーバーボーリングする場合に生じる中空コアのコアディスク現象は先進ボーリングの口径や中空コアの肉厚を変化させることによりその発生を制御できるため、地圧の推定に有効に利用できると思われるが、未だ十分な研究が進められていない。そこで中空コアのコアディスク現象の発生機構を理論解析を行って明らかにするとともに、この現象による高い地圧場での初期地圧推定法を検討する。さらに、初期地圧の測定を目的として行った実測例ではないが、炭鉱の重圧箇所での2次地圧の測定の際に発生した中空コアのコアディスク現象を理論解析結果と比較し、初期地圧推定法としての実際の適用性を検討する。

第3章では、筆者が実際の測定に深く関与した日本各地の初期地圧測定結果のうち、我が国で最も地下深い箇所での測定である佐々連鉱山の例や、1本のトンネル沿いに谷、斜面および尾根地形の直下で測定を行った関越トンネルの例など、特徴的な5箇所9地点の例を選び、その結果を各測定箇所毎に詳細に検討する。これらの初期地圧測定は、地下水力発電所や長大トンネルの工事設計などに関連した地下構造物の安定性の評価を目的としたものと、地震予知計画の一環として西日本各地の鉱山で行った地殻の応力状態の基礎的調査を目的としたものとに大別される。しかしいずれの場合も、測定された初期地圧状態はその地点の特徴を反映しており、地下岩盤内の初期地圧状態の実態とそれに影響を与える諸要因の関係を知る具体例として価値あるものと考えている。そこでこれらを、大きな水平地圧の存在が認められる結果と地形の影響を受けていると思われる結果に分類して考察する。

第4章では、上述の各地点の測定結果を含む日本各地の41地点において行われた信頼性の高い初期地圧測定結果に基づいて、我が国の初期地圧状態の一般的傾向を検討する。初期地圧状態を示す指標としては、主応力の方向と大きさ、鉛直地圧、平均水平地圧の大きさ、最大および最小水平地圧の方向と大きさなどがあげられる。また、これらは、測定地点の地表からの深さと密接な関係を有していると思われる。そこで、初期地圧の主応力方向の鉛直軸からの傾き、鉛直地圧・平均水平地圧・最大及び最小水平地圧と測定深度との関係につ

いて、実測結果を整理して示すとともに、諸外国で得られているこれらの傾向と比較する。

第5章では、初期地圧状態に影響を及ぼす諸要因について考察を加える。初期地圧状態は、造構応力と呼ばれる地殻構造の形成に関連した力の作用によって生ずる応力、地形、岩盤の不均質性による応力分布の相違、岩盤の流動的性質、過去の地殻変動による残留応力など、多くの要因の影響を受けていると思われる。そこで、地震学、測地学などの実測データや数学モデルを用いて、初期地圧に影響を及ぼすこれら諸要因の分析を行い、初期地圧評価のための要因の選定を行う。さらにその結果に基づき、初期地圧状態を推定するための方法の提案を試みる。

第6章は結論で、本研究により明らかになった結果をまとめている。

参考文献

- 1) Leeman, E.R.: The CSIR "Doorstopper" and triaxial rock stress measurements, Int. Symp. on the Determination of stresses in Rock Masses, Lisbon, No.28, pp.578-616 (1969)
- 2) Oka, Y., Kameoka, Y., Saito, T. and Hiramatsu, Y.: Investigations on the new method of determining rock stress by the stress relief technique and applications of this method, Rock Mechanics in Japan, Vol.3, pp.68-70 (1979)
- 3) 亀岡美友: ボアホール底面上の応力の解放による岩盤応力測定に関する研究, 京都大学学位申請論文 (1978)
- 4) 菅原勝彦, 尾原祐三, 岡村宏, 王遺南: 球面孔底ひずみ測定による3次元岩盤応力の決定, 日本鉱業会誌, 101巻, 1167号, pp.277-282 (1985)

- 5) 菅原勝彦, 尾原祐三, 岡村宏, 青木俊朗: 応力解放法による球面孔底ひずみの測定, 日本鉱業会誌, 102巻, 1182号, pp. 463-468 (1986)
- 6) Hiltcher, R., Martna, J. and Strindell, L.: The measurement of triaxial rock stresses in deep boreholes and the use of rock stress measurements in design and construction of rock opening, 4th ISRM Congress, pp.227-234 (1979)
- 7) National Mechanical Engineering Research Institute: Rock Mechanics Special Report No.29, Measurements of stress and ground movement in 55E12E stope, Cinderella Section, E.R.P.M., Pretoria, March (1959)
- 8) Leeman, E.R.: Measurement of stress in abutments at depth, Int. Strata Control Conf., Paris, Paper D.5, pp.295-311, May (1960)
- 9) Obert, L., Merrill, R.H. and Morgan, T.A.: Borehole deformation gauge for determining the stress in mine rock, U.S. Bureau of Mines, R.I.5978 (1962)
- 10) Suzuki, K.: Theory and practice of rockstress measurement by borehole deformation method, Int. Sym. on the determination of stresses in Rock Masses, Lisbon, No.4, pp.173-182 (1969)
- 11) 金川忠, 林正夫, 北原義浩: 地圧の計測法と応用, 電力土木, No. 163, pp. 31-42 (1979)
- 12) Kanagawa, T., Hibino, S., Ishida, T., Hayashi, M. and Kitahara, Y.: In situ stress measurements in the Japanese Islands: Over-coring results from a multi-element gauge used at 23 sites, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.23, pp.29-39 (1986)
- 13) Worotnicki, G. and Walton, R.J.: Triaxial hollow inclusion gauges for the determination of rock stress in situ, ISRM Sym. on Investigation of Stress in Rock and Advances in Stress Measurement, Supplement, pp.1-8, Sydney (1976)
- 14) Rocha, M., Siliverio, A., Pedro, J.O. and Delgado, J.S.: A new development of the LNEC stress tensor gauge, 3rd ISRM Congress, Denver, Vol.2A, pp.464-467 (1974)

- 15) Blackwood, R.L.: An instrument to measure the complete stress field in soft rock or coal in a single operation, Int. Sym. on Field Measurements in Rock mechanics, Zurich, Vol.1, pp.137-150 (1977)
- 16) Rocha, M. and Silverio, A.: A new method for the complete determination of the state of stress in rock masses, Geotechnique, Vol.19, pp.116-132 (1969)
- 17) Fairhurst, C.: Measurement of in situ rock stresses with particular reference to hydraulic fracturing, Rock Mechanics and Engineering Geol., Vol.2 (1964)
- 18) Haimson, B.C.: The hydrofracturing stress measuring method and recent field results, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.15, pp.167-178 (1978)
- 19) Haimson, B.C.: Near-surface and deep hydrofracturing stress measurements in the Waterloo quartzite, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.17, pp.81-88 (1980)
- 20) Zoback, M.D., Healy, J.D. and Roller, J.D.: Preliminary stress measurements in central California using the hydraulic fracturing technique, Pure and Applied Geophysics, No.115, pp.135-152 (1977)
- 21) 塚原弘昭, 池田隆司, 佐竹洋, 大竹政和, 高橋博: 静岡県岡部町における水圧破砕法による地殻応力の測定, 地震2, 31巻, pp.415-433 (1978)
- 22) 水田義明, 荻野正二, 佐野修: 水圧破砕による3次元岩盤応力測定法について, 第15回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.116-120 (1983)
- 23) 厨川道雄, 小林秀男, 松永烈, 小杉昌幸: 地圧計測のための水圧破砕データの解析, 第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.96-100 (1985)
- 24) 金川忠, 林正夫, 仲佐博裕: 岩石における地圧成分の Acoustic Emission による推定の試み, 土木学会論文報告集, 258号, pp.63-75 (1977)
- 25) 金川忠, 北原義浩, 林正夫: 岩石の AE カイザー効果を利用した地圧測定法, 電力中央研究所研究報告 No. 381004 (1981)

- 26) 村山朔郎, 道広一利, 齊藤二郎, 吉岡尚也: 載荷方法が花崗岩のカイザー効果に及ぼす影響, 土木学会論文集, 364号/Ⅲ-4, pp. 107-112 (1985)
- 27) McElroy, J.J., Koerner, R.M. and Load, A.E.: An acoustic jack to assess in situ rock behavior, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.22, pp.21-29 (1985)
- 28) 山本清彦, 糸原保人, 平沢朋郎: 変形率変化を用いた先行応力の推定, 地震学会講演予稿集, 昭和58年度春季大会, p. 245 (1983)
- 29) Ren, N.C. and Roegiers, J.C.: Differential strain curve analysis. (A new method for determining the pre-existing in-situ stress state from rock core measurements), 5th ISRM Congress, pp.F117-F127, Melbourne (1983)
- 30) Bridgman, P.W.: Breaking tests under hydrostatic pressure and conditions of rupture, Phil. Mag., Vol.24, pp.63-80 (1912)
- 31) Jeager, J.C. and Cook, N.G.W.: Pinching-off and diskings of rocks, J. Geophys. Res., Vol.68, No.6, pp.1759-1765 (1963)
- 32) Obert, L. and Stephenson, D.E.: Stress conditions under which core discing occurs, Trans. SME, AIME, Vol.232, pp.227-235 (1965)
- 33) Durelli, A.J., Obert, L. and Park, V.J.: Stress required to initiate core discing, Trans. SME, AIME, Vol.241, pp.269-276 (1968)
- 34) 菅原勝彦, 亀岡美友, 斎藤敏明, 岡行俊, 平松良雄: コアディスクング現象に関する研究, 日本鉱業会誌, 94巻, 1089号, pp. 797-803 (1978)
- 35) Stacey, T.R.: Contribution to the mechanism of core discing, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., pp.269-274, September (1982)
- 36) 小林良二, 杉本文男: コア・ディスクングに関する実験的研究, 日本鉱業会誌, 99巻, 1143号, pp. 359-364 (1983)
- 37) 日本材料学会編: 岩石力学とその応用, 丸善, pp. 229-232, (1966)
- 38) 菅原勝彦, 木村治: 炭壁圧出区域の異常地圧と放圧ボーリングの効果, 日本鉱業会誌, 97巻, 118号, pp. 233-237 (1981)

- 39) McCutchen, W.R.: Some elements of a theory for in-situ stress, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.19, pp.201-203 (1982)
- 40) McGarr, A. and Gay, N.C.: State of stress in the earth's crust, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, pp.405-436 (1978)
- 41) Brown, E.T. and Hoek, E.: Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.15, pp.211-215 (1978)
- 42) Ranalli, G.: Geotectonic relevance of rock-stress determinations, *Tectonophysics*, Vol.29, pp.49-58 (1975)
- 43) Hast, N.: The state of stress in the upper part of the earth's crust, *Tectonophysics*, Vol.8, pp.169-211 (1969)
- 44) Bulin, N.K.: The present stress field in the upper parts of the crust, *Geotectonics*, Vol.3, pp.133-139 (1971)
- 45) Anderson, E.M.: *The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britan*, Second Edition Revised, Oliver & Boyd, Edinburgh, p.144 (1951)
- 46) 平松良雄, 岡行俊, 伊藤英文, 田中豊: 岩盤内の地山応力と地学的に推定される地殻応力との関連について, *材料*, 23巻, 248号, pp 87-93 (1974)
- 47) 塚原弘昭, 池田隆司: 関東・東海地域の地殻応力, *地震* 2, 36巻, 4号, pp. 571-586 (1983)
- 48) Lindner, E.L. and Halpern, J.A.: In-situ stress in North America: a compilation, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.15, pp.183-203 (1978)
- 49) 平松良雄, 岡行俊: 地形が地圧に及ぼす影響の実験的研究, *水曜会誌*, 15巻, 2号, pp. 57-60 (1963)
- 50) 中島健: 地殻応力場に及ぼす地形の影響(Ⅰ), *地震* 2, 35巻, 4号, pp 591-606 (1982)
- 51) McTigue, D.F. and Mei, C.C.: Gravity-induced stresses near topography of small slope, *J. Geophys. Res.*, Vol.86(B10), pp.9268-9278 (1981)
- 52) Savage, W.Z., Swolfs, H.S. and Powers, P.S.: Gravitational stresses in long symmetric ridges and valleys, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.22, pp.291-302 (1985)

- 53) Sbar, M.L., Engelder, T., Plumb, R. and Marshak, S.: Stress pattern near the San Andreas fault, Palmdale, California from near-surface in situ measurements, J. Geophys. Res., Vol.84(B1), pp.156-164 (1979)
- 54) Zoback, M.D., Tsukahara, H. and Hickman, S.: Stress measurements at depth in the vicinity of the San Andreas fault: Implications for the magnitude of shear stress at depth, J. Geophys. Res., Vol.85(B11), pp.6157-6173 (1980)
- 55) Sbar, M.L., Richardson, R.M., Flaccus, C. and Engelder, T.: Near-surface in situ stress. 1. Strain relaxation measurements along the San Andreas fault in southern California, J. Geophys. Res., Vol.89(B11), pp.9323-9332 (1984)
- 56) Greiner, G. and Illies, J.H.: Central Europe: Active or residual tectonic stresses, Pure and Applied Geophysics, Vol.115, pp.11-26 (1977)
- 57) Kanagawa, T., Komada, H. and Hayashi, M.: Measurements of tectonic stresses, strain rate related to active faults and observed earthquakes around large cavern, Proc. of 5th International Congress on Rock Mechanics, Melbourne, Australia (1983)
- 58) 鈴木光, 西松裕一, 石島洋二: 一次地圧の測定値とその粘弾性論的考察(第1報) 日本鉱業会誌, 83巻, 950号, pp.793-799 (1967)
- 59) 堀正幸: カナダ・オンタリオ州における岩盤内応力測定, 土木学会誌, 1978年6月号, pp.66-71

第2章 高い地圧場における初期地圧 推定法¹⁾

2.1. 緒言

高い地圧場でコアボーリングを行うと、ボーリング孔の孔壁が崩壊したり、コアが写真2-1や写真2-2に示すようにボーリング軸と直交する方向に一定の厚さの円盤状に割れて採取される、いわゆるコアディスキング現象が発生する場合がある。筆者も地下1000m程度以深での初期地圧測定や、それより浅い場合でも地下空洞の掘削により応力集中が生じている周辺岩盤内での応力（2次地圧）測定の際に、しばしばこのような現象に遭遇した。このような現象が発生すると、ボーリング孔内にゲージを設置することが困難になったり、設置できてもオーバーコアリングの際にゲージがコアとともに破壊されるなど、従来開発されてきた方法では初期地圧の測定が困難となる。しかし、このような高い地圧場においては通常の場合以上に初期地圧状態の評価が重要であり、また、空洞の掘削に伴って変化する2次地圧の把握も重要となる。従って、従来の測定法と観点の異なる新たな初期地圧推定法の開発が必要と考えられる。

このような高い地圧場における簡便な初期地圧推定法として、上述のコアディスキング現象を利用する方法が考えられる。コアディスキング現象は地圧によるボーリングビット刃先付近の岩盤内の応力集中により発生するものと思われるから、その発生条件を明らかにすれば、コアボーリングを行うだけで地圧状態が判明することになり、極めて簡便に初期地圧状態を推定することができる。特に、オーバーコアリングの際に得られる写真2-2のような中空コアの場合、コアの口径や肉厚を変化させることにより、コアディスキング現象の発生を制御できる可能性があるから、初期地圧の推定法としては通常のコアディスキングよりも一層有効と思われる。

コアディスキング現象に関しては、Jaeger²⁾ら、Obert³⁾ら、Durelli⁴⁾ら、菅原⁵⁾ら、Stacey⁶⁾、小林⁷⁾らが解析的・実験的に研究を行ってきているが、これらは主に通常のコアのコアディスキング現象に関する研究である。中空コアのコアディスキング現象についてはいくつかの論文で言及されているものの、詳

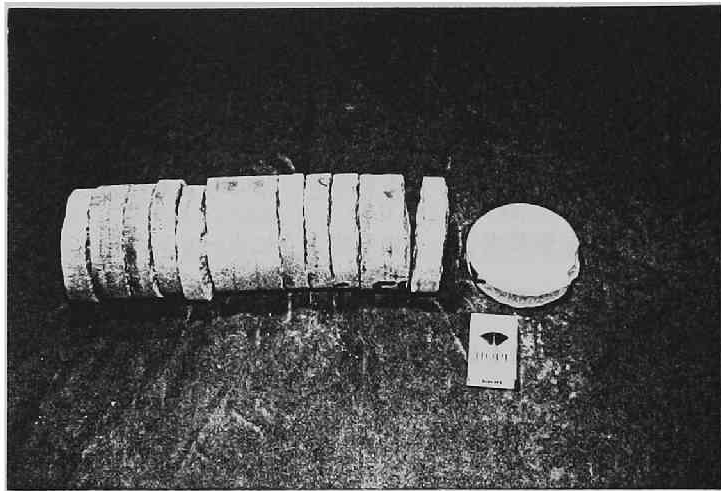


写真2-1. 通常のコアのコアディスクング現象の例

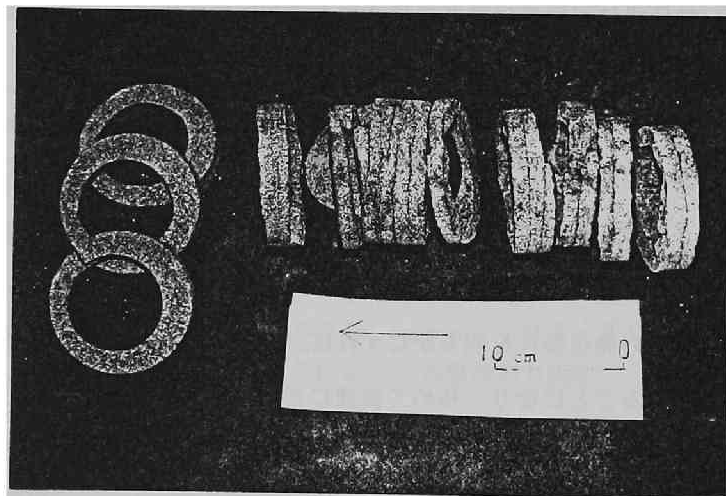


写真2-2. 中空コアのコアディスクング現象の例
(矢印はボーリングの掘進方向を示す)

細な検討は未だなされていない。そこで本章では、高い地圧場における初期地圧推定法として中空コアのコアディスクング現象に注目し、まず実際にこの現象が発生した中空コアを観察してその特徴を調べる。次に、小口径の先進ボーリング孔の周囲を大口径でオーバーコアリングする際の大口径ボーリング刃先

付近の応力状態を有限要素法を用いた弾性解析により明らかにするとともに、コア長さと内外径比がこの応力状態に及ぼす影響を検討する。さらに、それらの結果に基づいて、中空コアのコアディスキング現象が発生する地圧条件を理論的に明らかにし、いままでに報告されている実験結果と比較検討する。そして最後に、初期地圧を測定する目的で行った例ではないが、炭鉱の重圧箇所での2次地圧の測定の際に発生したコアディスキング現象を理論解析結果と比較し、初期地圧推定法としての適用性を検討する。

2. 2. 高い地圧場における中空コアの破壊機構

高い地圧場における中空コアのコアディスキング現象の発生条件を知るためには、まずその破壊機構を明らかにする必要がある。そのためには、どのような破壊が実際に生じているのかを十分に把握するとともに、岩盤内の破壊発生箇所近傍の応力状態を明らかにすることが重要であろう。そこでここでは、実際に破壊現象の生じた中空コアの観察に基づいて、その破壊の特徴を明らかにする。また、有限要素法を用いて単純な地圧が作用した場合のボーリング刃先付近の岩盤内の応力状態を解析し、高い地圧場における中空コアの破壊機構を明らかにする。さらに、この応力状態に対するコア長さと中空コアの内外径比の影響も検討する。

2. 2. 1. 中空コアのコアディスキング現象の特徴

コアディスキング現象の発生した中空コアを詳しく観察すると、次の特徴があることがわかる。

- (1) 通常のコアのコアディスキング現象の場合と同様、コアは一定の厚さ毎に破壊が生じている。従って中空コアの場合も、大口径ボーリングの刃先が一定の深さまで進入するたびにコアディスキング現象が生じると思われる。
- (2) 破壊面は比較的滑らかな平面であり、このような破壊は引張破壊であろうと想像される。

(3) 中空コアの破壊が完全に生じていない場合、コアの外側に一定間隔をもって亀裂が生じている。従って、中空コアの破壊は大口径ボーリングの刃先側から起こっていると考えられる。

(4) 中空コアのコアディスキング現象が生じた場合でも、オーバーコアリングに先だって行った中心のボーリングのコアは破壊していないことが多い。従って、中空コアのコアディスキングは、通常のコアのコアディスキングよりも発生しやすい現象と考えられる。

以下では、これらの観察結果を参考にして応力解析を行い、中空コアのコアディスキング現象の発生機構を検討することにする。

2. 2. 2. ボーリング刃先付近の応力状態

一般的な地圧が作用する岩盤中に穿たれた小口径先進ボアホールの周囲をオーバーコアリングする場合、このオーバーコアリング刃先付近の応力状態は、軸対称回転体に非軸対称荷重が作用すると考えて解析すればよい。このような解析には、川股⁸⁾が提案した有限要素法による数値解析法⁹⁾を用いることができる。図2-1に解析モデルの見取図、断面図及び座標系を示す。円柱及び直角座標をそれぞれ r, θ, z 及び x, y, z とし、 z 軸を回転体の軸に一致してとるものとする。解析モデルは完全弾性体の直方体で、そのひとつの側

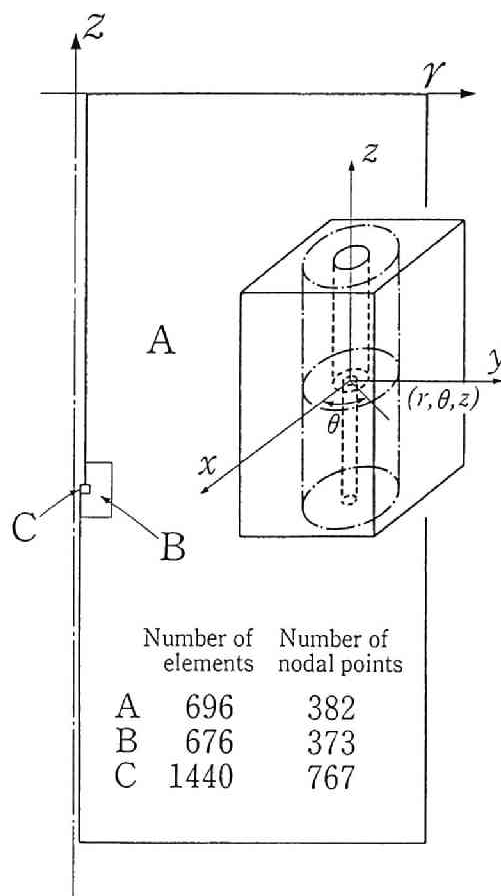


図2-1. 解析モデルの見取図、断面図と座標系

面の中央から中心まで大口径のボアホールを、中心から反対の側面まで大口径と同軸に小口径のボアホールを設けたものである。刃先付近の解析精度を高めるために、まずモデル全域の粗い解析を行い、次に解析モデルの範囲を狭くして、さきの解析で得た変位を新しい局部モデルの境界条件として利用する方法を用いた。

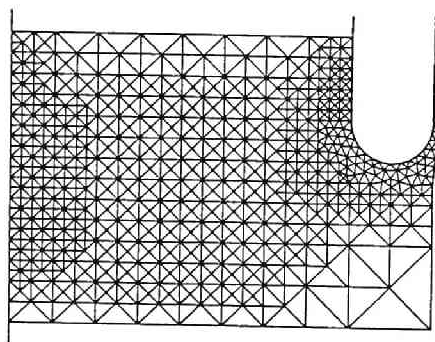


図 2-2. 要素分割の例

図 2-1 の A, B, C はこの方法による解析の範囲を示している。解析モデル C での刃先付近の要素分割図を図 2-2 に示す。载荷条件は、図 2-3 に示すように、 z 軸方向に一樣な分布荷重 P_z を作用させるものと、 x 軸方向、 y 軸方向にそれぞれ一樣な分布荷重 P_x , P_y を作用させるものの 3 通りを採用し、分布荷

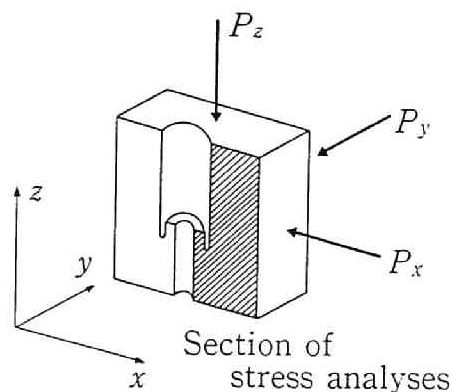


図 2-3. 载荷方向と解析断面

重の大きさは一定とし材料の 1 軸引張強度 S_t と等しい大きさとした。また、解析の断面を同図に示す $x-z$ 面に定め、各载荷によるこの面の応力状態を求めた。ポアソン比は 0.25 とした。

さて、刃先付近の破壊しやすさを何らかの方法で評価できれば、コアディスクキング現象の理解の助けになる。そこで、応力解析結果を利用して、各点の応力状態を示すモールの応力円と破壊包絡線との関係から、その点の破壊のしやすさを評価する尺度として破壊限接近度なる概念を導入する。^{10)~12)} なおここで、破壊に至るまで、材料は完全に弾性的に挙動するものとする。従って、材料中の各点の主応力比は荷重系が変化しない限り不変であり、主応力は荷重の増加に伴って増加する。いま、破壊包絡線にグリフィスの破壊規準

$$\tau^2 = 4 S t (S t - \sigma) \quad \text{-----} \quad (2-1)$$

を用いることにし、これを図示すると図2-4の放物線Ⅰとなる。ここに、 τ 及び σ はモール線図のせん断応力及び直応力であり、 $S t$ は材料の1軸引張強度である。任意の応力状態はモールの応力円により、放物線Ⅰの内側に描ける（応力円Ⅱ）。一方、破壊状態を表す応力円は放物線Ⅰに接する（応力円Ⅰ）。ところで、応力円Ⅱは次の式で与えられる放物線Ⅱに接している。

$$\tau^2 = 4 S' t (S' t - \sigma) \quad \text{-----} \quad (2-2)$$

ここに、 $S' t$ は次の式で与えられる。

$$S' t = s \cdot S t \quad \text{-----} \quad (2-3)$$

放物線Ⅱに接している任意の応力円Ⅱは、主応力比を一定に保って $1/s$ 倍されると、放物線Ⅰに接する応力円Ⅰになる。従って(2-3)式の s は応力円Ⅱが破壊時の応力円Ⅰに接近する度合を与えている。これを破壊限接近度と呼び、以下簡単に s 値と表現する。従って例えば、 $P x$ 载荷による s 値の分布が得られ、ある点で s 値が最大値 s_{max} になっている場合、 $P x = S t / s_{max}$ の载荷状態でこの点からコアの破壊が始まると考えることができる。なお、応力解析結果からは3次元的な応力状態が得られるが、破壊限接近度は2次元的な応力状態で定義される。

筆者は中空コアのコアディスキング現象で生じる破壊面がボアホール軸に直交する比較的滑らかな平面であることから、このような破壊はボーリング軸方向の直応力 σ_z が引張応力状態にある場合に生じる引張破壊もしくは引張とせん断の複合破壊であると考えてこの応力に注目し、 σ_z と他の

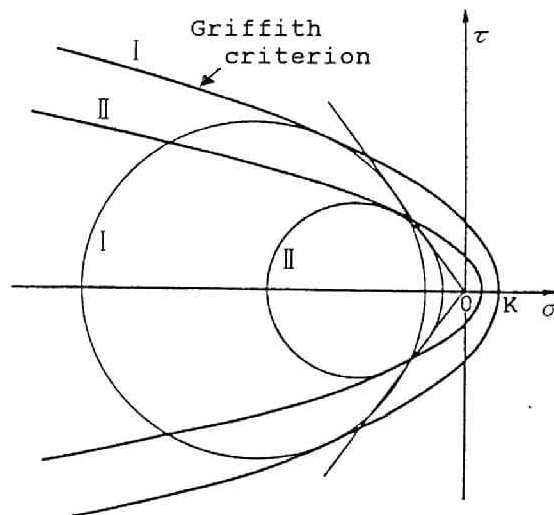


図2-4. モールの応力円とグリフィスの破壊規準との関係(2)

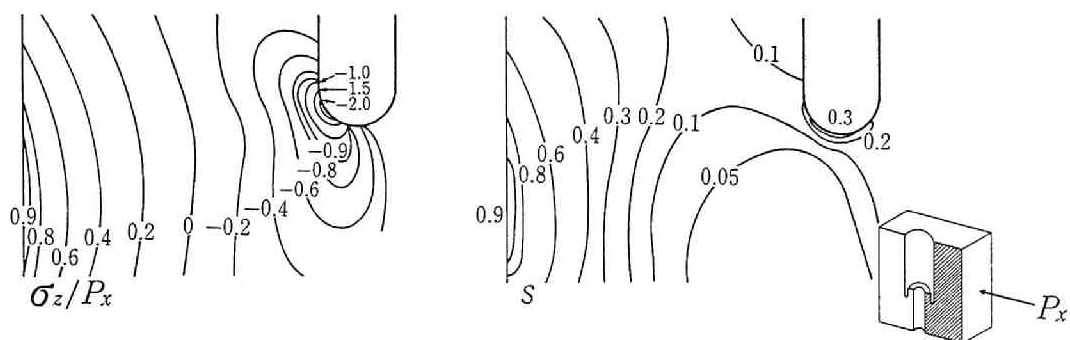


図2-5. P_x 荷荷の場合の σ_z と s 値の分布

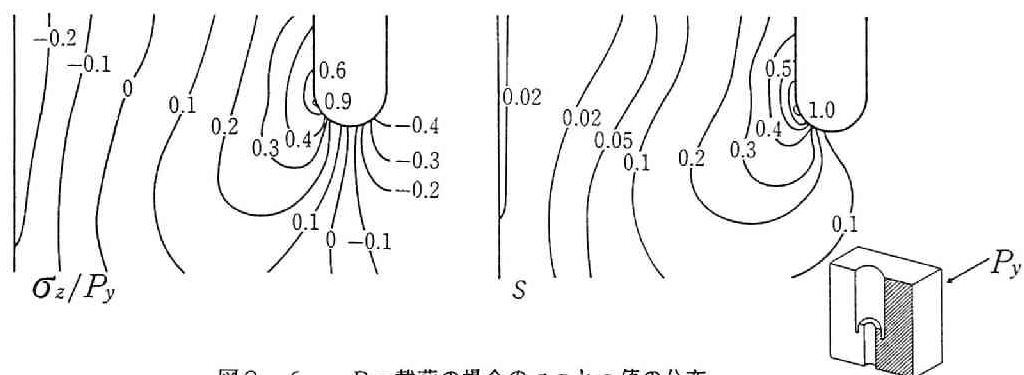


図2-6. P_y 荷荷の場合の σ_z と s 値の分布

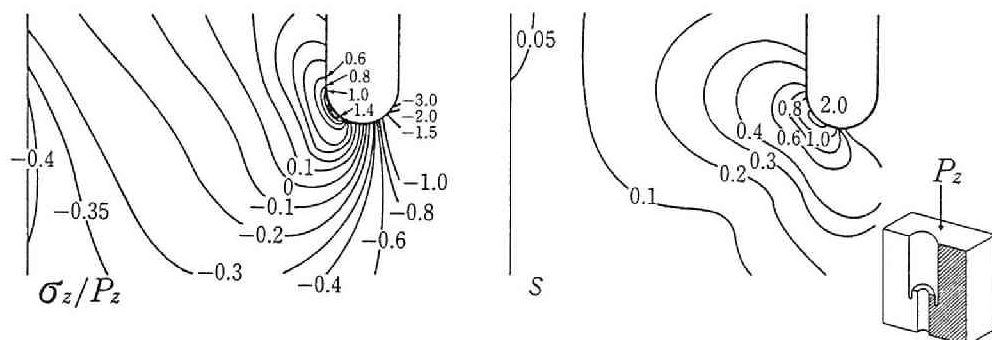


図2-7. P_z 荷荷の場合の σ_z と s 値の分布

2つの直応力 σ_r 、 σ_θ のうち s の値が大きくなる一方と組み合わせて s 値を求めた。

P_x 、 P_y 、 P_z の各载荷がコアの破壊にどのような影響を与えるかを知るため、各载荷における σ_z と s 値の分布を図2-5、6および7に示す。応力解析の結果を見ると、応力集中はいずれの载荷の場合も、ボーリング刃先の部

分および刃先よりやや下方のコア内側の部分で大きくなっている。

説明の便宜上、図2-8に示すように前者をA領域、後者をB領域と呼ぶことにする。表2-1は、各载荷における s 値を、A、B各領域内の一点に注目して整理したものである。表中下線を施した数値は引張破壊に進行する場合の s 値である。またこの表には、別途解析を実施して求めた P_x 、 P_y 、 P_z が種々の割合で同時に作用する場合の s 値も示した。

表2-1を見ると、 P_x 、 P_y 、 P_z の各载荷が単独で作用する場合に s 値が最も大きい値をとるのは、 P_z 载荷の場合のA領域つまり刃先付近であることがわかる。また、 P_y 载荷の場合のA領域および P_x 载荷の場合のB領域でも s 値が大きくなる。これらはいずれも引張破壊に進行する場合の s 値である

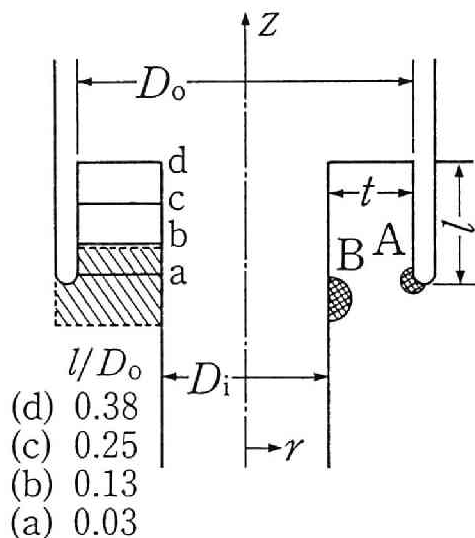


図2-8. A領域、B領域、内外径 D_i 、 D_o とコア長さ l の変化

表2-1. A領域とB領域における s 値

(下線を施した数値は引張破壊に進行する場合の s 値)

loading		$P_x/S_t=1.0$	$P_y/S_t=1.0$	$P_z/S_t=1.0$	$P_x/S_t=1.0$ $P_y/S_t=1.0$ $P_z/S_t=1.0$	$P_x/S_t=1.5$ $P_y/S_t=1.0$ $P_z/S_t=1.0$	$P_x/S_t=1.0$ $P_y/S_t=1.5$ $P_z/S_t=1.0$	$P_x/S_t=1.0$ $P_y/S_t=1.0$ $P_z/S_t=1.5$
S	A	0.31	<u>0.97</u>	<u>2.07</u>	0.07	0.22	0.10	<u>0.33</u>
	B	<u>0.95</u>	0.02	0.05	<u>0.33</u>	<u>0.80</u>	<u>0.22</u>	<u>0.13</u>

から、 P_z 、 P_y 载荷では A 領域で、 P_x 载荷では B 領域で引張破壊が発生しやすくなるといえる。そこで筆者は、中空コアのコアディスキング現象は、ボーリング軸方向（ z 方向）の引張応力が A 領域から B 領域へコアを横断する部分に発生することにより、最も s 値の大きい部分で生じた亀裂が拡大し、コアを破壊するものであると考え、 P_x 、 P_y 、 P_z が種々の割合で同時に作用する場合の A 領域、B 領域における s 値を検討することにした。表 2-1 より、各载荷を組み合わせた時の s 値は、各载荷が単独で作用する場合よりも小さいことがわかる。また、 $P_x/S_t = 1/5$ と P_x 载荷を P_y 、 P_z の 1.5 倍にした場合、B 領域で $s = 0.80$ とかなり s が大きくなっている。しかしこの場合、A 領域の σ_z は圧縮応力であるため、B 領域で引張破壊が生じても局所的であり、コアの破壊は生じないと考えられる。一方、 $P_z/S_t = 1/5$ と P_z 载荷を大きくした場合の s 値を見ると、A 領域、B 領域ともに引張破壊に進行する s 値を示していることがわかる。この場合は、载荷を大きくすれば A 領域つまりボーリング刃先部分から亀裂が生じ、コアを横断して亀裂が拡大しコアの破壊に至ると思われる。以上のことから、中空コアのコアディスキング現象の発生には、 P_z 载荷による影響が最も大きい、つまり、ボアホール軸方向の地圧成分が大きい場合に、ボーリング刃先側から引張破壊が生じて亀裂が中空コアを横断しコアディスキング現象が発生すると考えられる。

2. 2. 3. コア長さと内外径比の影響

次に、コア長さ l と内外径比 D_i/D_o の違いが中空コアのコアディスキング現象の発生にどのような影響を与えるかを検討する。

まず、コア長さが変化した場合、 s 値がどのように変化するかを調べるため、図 2-8 に示した $l/D_o = 0.03 \sim 0.38$ の 4 段階のコア長さについて解析を行った。なお、これまでに述べた解析結果は図 2-8 のコア長さが最も長い $l/D_o = 0.38$ の場合であり、図 2-5, 6 および 7 には、解析領域のうち図 2-8 の斜線の範囲の結果のみを示した。

解析結果の一例として、図 2-9 に P_z 载荷による s 値の分布がコア長さの

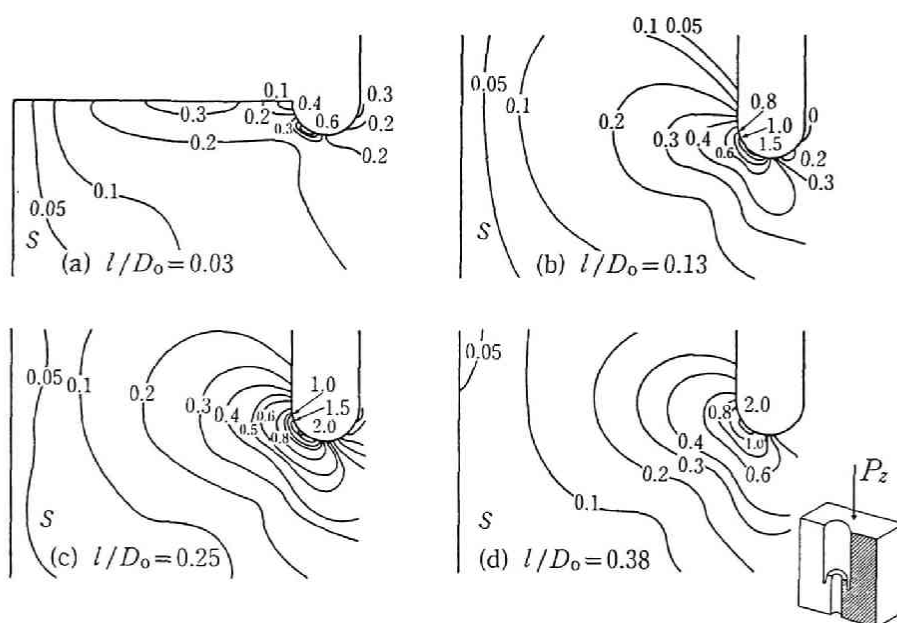


図 2-9 コア長さ l の変化に伴う s 値の分布の変化 (P_z 载荷の場合)

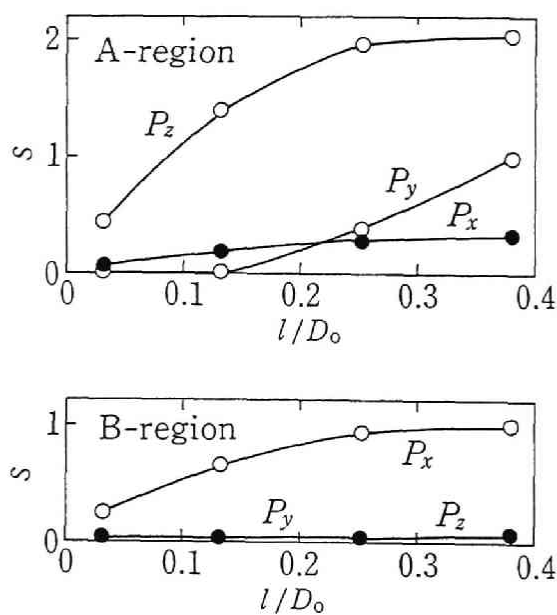


図 2-10. コア長さ l の変化に伴う s 値の変化

変化につれてどのように変わるかを示した。この図でA領域の s 値に注目すると、 $l/D_o=0.03$ では0.6程度であった s 値が、刃先が進入してコア長さが増すにつれて急激に大きくなり、 $l/D_o=0.13$ では1.5、 $l/D_o=0.25$ では2.0と増大していくことがわかる。しかし、 $l/D_o=0.38$ での s 値は2.0と $l/D_o=0.25$ の場合と同じであり、A領域の s 値は $l/D_o \geq 0.25$ でほぼ一定の値になるといえる。このようなコア長さと s 値の関係を、 P_x 、 P_y 、 P_z の各載荷毎に、A領域、B領域それぞれについて整理したのが図2-10である。図中、白丸は引張破壊に進行する場合の s 値、黒丸は圧縮破壊に進行する場合の s 値である。この図で引張破壊へ進行する s 値は、A領域では P_z 載荷と P_y 載荷、B領域では P_x 載荷の場合であるが、これらはいずれもコア長さが短い時は小さく、長くなるにつれて増大し一定の値になることがわかる。このことは、ボーリングの刃先が深く進入していくにつれてコアに引張破壊が生じやすくなることを示しており、中空コアのコアディスキング現象の破壊が一定間隔毎に生じることを合理的に説明できる。

次に、内外径比 D_i/D_o （図2-8参照）の違いが中空コアのコアディスキング現象の発生に及ぼす影響を検討する。載荷条件については、すでに述べた結果から P_z 載荷の影響が大きいことがわかったので単純化し、 P_z とこれに直交する方向の周圧 P_r の2種類の載荷についてのみ検討することにした。ここに P_r 載荷は、 P_x と P_y を同時に $P_x=P_y=P_r$ の大きさに載荷した場合に生じる応力状態と等価である。解析を行ったのは、コアの長さが最も長い $l/D_o=0.38$ の場合であり、またこれまでに示した解析結果は、いずれも内外径比 $D_i/D_o=0.50$ の場合であった。

解析は図2-11の左上のモデル図に示すように、コアの肉厚 t とコア長さ l を一定にとり、解析モデルの対称軸を移動させることにより内外径比を変化させた。解析結果の一例として、同図に P_z 載荷による刃先付近の σ_z の分布が内外径比の変化につれてどのように変わるかを示した。図示したのはモデル図で斜線を施した範囲である。この図で中空コアのコアディスキング現象に最

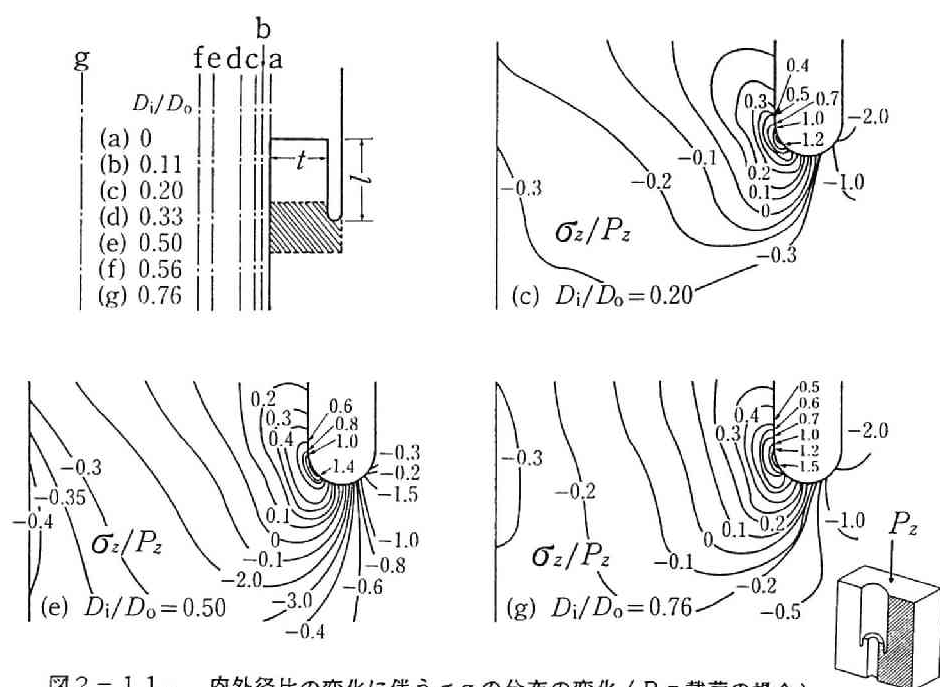


図 2-11. 内外径比の変化に伴う σ_z の分布の変化 (P_z 载荷の場合)

も密接な関係があると思われる A 領域の σ_z を見ると、内外径比 D_i/D_o が大きくなる、つまり薄肉になるほどその値が大きくなることがわかる。このように P_z 载荷の場合には σ_z の引張応力は A 領域で生じるが、一方同様に P_r 载荷の場合の解析を行うと図には示していないが σ_z の引張応力は B 領域に生じる。そこでこのような解析結果から、 P_z または P_r のみを载荷したときに発生する σ_z の引張応力の最大値を縦軸に、内外径比を横軸にとって示したものが図 2-12 である。この図を見ると、 P_z 载荷では A 領域で、 P_r 载荷では B 領域で σ_z が引張応力となり、その最大値はいずれも内外径比 D_i/D_o が大きくなるにつれて大きくなることがわかる。従って、 P_z 、 P_r いずれの载荷に対しても、内外径比の増大とともにコアの引張破壊が生じやすくなるといえる。

次に中空コアのコアディスキング現象をさらに詳細に調べるため、A 領域から B 領域に至るコア全体の破壊に対する内外径比の影響を検討する。応力解析の結果比較的大きな引張応力が得られた場合、それが広い範囲に分布すれば破

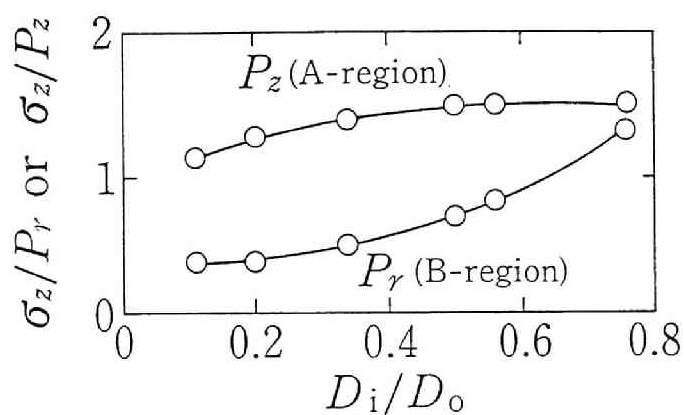


図2-12. P_z 荷重によってA領域に生じる σ_z の最大値及び
 P_r 荷重によってB領域に生じる σ_z の最大値（い
 ずれも引張応力）の内外径比による変化

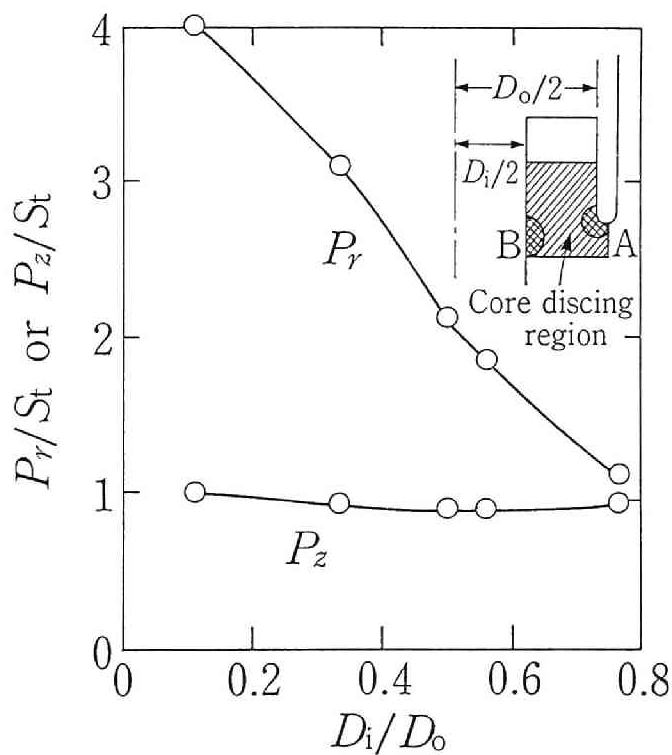


図2-13. P_r または P_z のみを荷重したときに斜線部の領域が
 平均的に破壊するのに必要な荷重値と内外径比との関係

壊の可能性は高いが、その分布が狭ければ破壊に至らないと思われる。そこで、A領域とB領域を含む刃先からコアの内側に至る領域をコアディスキング領域（図2-13の右上の図で斜線を施した部分）と呼び、この領域が平均的に破壊する荷重条件を、破壊の確率論を用いて評価することにした。用いた方法は、最弱リンク説に基づいて材料の強度が均一係数 m のWeibull分布に従うと仮定し、対象領域（体積 V ，要素数 N ）が平均的に破壊する条件を、 i 番目の要素（体積 V_i ）の破壊限接近度を s_i として、

$$\sum_{i=1}^N s_i^m \cdot V_i / V = 1 \quad \text{-----} \quad (2-4)$$

で表わせるとするものである。¹¹⁾¹²⁾従って、ある荷重状態 P （例えば、 $P_z = a$ ， $P_r = b$ の大きさの荷重を同時に行った状態）で、前式の左辺の値が $1/\lambda$ であったとすると、主応力比一定で荷重荷重の大きさを λ 倍すれば、すべての要素で s_i はそのまま λ 倍されるから、 $\lambda \cdot P$ （ $P_z = \lambda a$ ， $P_r = \lambda b$ の大きさの荷重を同時に行った状態）が対象領域が平均的に破壊する荷重条件となる。

解析結果を図2-13に示す。同図は、内外径比を横軸にとり、 P_r または P_z のみを荷重したときにコアディスキング領域が平均的に破壊する荷重値を縦軸にとって示したものである。この図より、 P_z は常に P_r の値より小さく、中空コアのコアディスキング現象は P_r 荷重よりも P_z 荷重で起こりやすいこと、また、内外径比の増大によりコアディスキング現象を発生させるに必要な P_z 荷重の大きさはあまり変化しないが P_r 荷重の大きさはかなり減少し、同一の大きさの P_r 荷重のもとでは薄肉になるほど中空コアのコアディスキングが発生しやすくなることがわかる。

2. 3. 中空コアのコアディスキング現象が発生する地圧条件

前節では、観察に基づいて中空コアのコアディスキング現象の特徴を調べるとともに、単純な地圧が作用する場合のボーリング刃先付近の岩盤内の応力状態を明らかにした。また、この応力状態に対するコア長さや内外径比の影響も明らかにし、高い地圧場における中空コアの破壊機構を検討した。

さて、中空コアのコアディスキング現象を初期地圧状態の推定に利用するた

めには、この現象が発生する地圧条件を明らかにする必要がある。そこでここでは、中空コアのコアディスキング現象が発生する地圧条件を理論解析により明らかにするとともに、その結果を Obert³⁾らの実験結果やコアディスキング現象発生箇所における地圧測定結果と比較する。

2.3.1 理論解析により求めた発生条件と実験結果の比較

中空コアのコアディスキング現象が発生する地圧条件は図2-13のコアディスキング領域が平均的に破壊する載荷条件と考えることができる。そこで、前述の破壊の確率論を用い、(2-4)式が満足されたときコアディスキング現象が発生すると考えた。また、載荷条件は前節の検討結果を踏まえて単純化し、ボーリング軸方向の P_z 載荷とこれに直交する方向の周圧 P_r の2種類についてのみ検討することにした。内外径比 $D_i/D_o=0.50$ の場合について、 P_r/P_z を様々な比で組み合わせて載荷し、コアディスキング領域が平均的に破壊する荷重値を求め、これを引張強度 S_t で正規化して示したものが図2-14である。またこの図には、菅原⁵⁾らが示した通常のコアに対するコアディスキング現象の発生条件も示した。

この結果をすでに報告されている室内実験の結果と比較することは興味もたれる。Obert³⁾らは、内外径比0.31の石灰岩と砂岩の中空コアのコアディスキング現象の発生条件を実験的に求め、それぞれ、

$$P_r/S_t = 4.76 + 0.89 P_z/S_t \quad \text{-----} \quad (2-5)$$

$$P_r/S_t = 8.13 + 1.00 P_z/S_t \quad \text{-----} \quad (2-6)$$

の発生条件式を示している。図2-14の結果と比較するためには、内外径比の違いを補正する必要がある。そこで図2-13をみると、図2-14で検討した内外径比 $D_i/D_o=0.50$ の場合は、彼らの実験における0.31の場合と比較して、コアディスキング現象の発生に要する P_z の値にはあまり差はないが、 P_r の値はかなり小さく0.66倍程度である。そこで(2-5)、(2-6)式の右辺をいずれも0.66倍し、

$$P_r/S_t = 3.14 + 0.59 P_z/S_t \quad \text{-----} \quad (2-7)$$

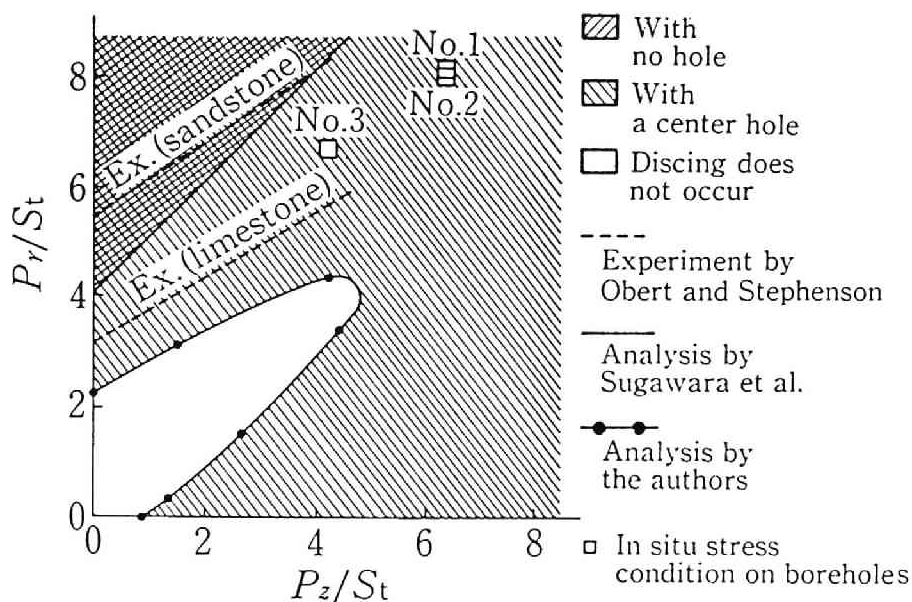


図2-14. コアディスキング現象の発生条件

$$P_r/St = 5.37 + 0.66 P_z/St \quad \text{-----} \quad (2-8)$$

を、 $D_i/D_o = 0.50$ における中空コアのコアディスキング現象の発生条件として図2-14に破線で示した。なお破線の荷重範囲は、彼らの実験の荷重範囲に対応している。この図より、筆者ら求めた発生条件は、彼らの実験結果より小さな P_r/St の値で中空コアのコアディスキング現象が発生することを示しているが、 P_z/St に対する P_r/St の増加の割合がほぼ同程度である点で、よい一致を示すことがわかる。

なお、図中の□印は現場の地圧状態を示しており、これについては次項で詳しく述べる。

2.3 2. コアディスキング現象発生箇所における地圧状態の実測

実際にコアディスキング現象が発生した現場の地圧状態を知ることができれば、コアディスキング現象の発生に関する最も重要な直接的データを得ることができる。しかし、このような研究は筆者の知る限りでは Zhu¹³⁾らが報告しているだけであり、この場合もボアホール軸に直交する方向の2次元的地圧状態と

の簡単な比較を行っているにすぎない。重要な研究でありながらこの種の調査があまりなされていないのは、すでに述べたように、コアディスクキング現象が発生した場合地圧状態の測定が困難になるためと思われる。筆者は、北炭幌内炭鉱の地下深部の重圧箇所では激しいコアディスクキング現象に遭遇し、多くの失敗を重ねながらも、その箇所の地圧状態の測定に成功した。この結果は初期地圧ではなく2次地圧の測定結果であるが、実際に発生したコアディスクキング現象をその箇所の地圧状態と直接比較できる貴重なデータと考えられる。そこで、図2-14に示した理論解析結果をこの地圧測定結果と比較し、その妥当性を検討することにする。

図2-15は、調査現場の坑内図で、ボアホールの配置と岩種、コアディスクキングの発生範囲、地圧測定位置を示している。立坑の保安残柱内に位置する地表下1055mのこの地点では、岩石坑道の掘進の際に岩盤が突然細かく破碎される、当炭鉱で岩石異常破碎現象と呼ぶ一種の山はね現象が発生した。ボーリングは、この異常破碎現象の調査のために拡張された坑道側壁の空洞内から行った。いずれのボアホールにおいても孔口からの5～6m間ではコアディスクキング現象は発生せず、数cm～数10cmの断続したコアが回収された。この領域は異常破碎による破碎域の最も外側の部分に相当し、すでに地圧が解放されていたものと思われ、この領域をすぎたところから激しいコアディスクキング現象が発生した。No. 1及びNo. 2ボアホールは異常破碎の発生した粗粒砂岩中を掘進し、掘進中に直径146mm（コア径116mm）及び直径75mm（コア径60mm）の通常コアのコアディスクキング現象、内径75mm外径116mmの中空コアのコアディスクキング現象が発生した。一方No. 3ボアホールは、異常破碎の発生した粗粒砂岩中とさらにその上盤側の異常破碎を起こしていない細粒砂岩中を掘進したが、直径146mm、直径75mmとも通常コアのコアディスクキングは発生せず、内径75mm外径116mmの中空コアのコアディスクキング現象のみが発生した。本章のはじめに示した写真2-1, 2-2は、それぞれNo. 1ボアホールの6m付近及びNo. 2ボアホールの16m付近で発生したコアディスクキング現象である。

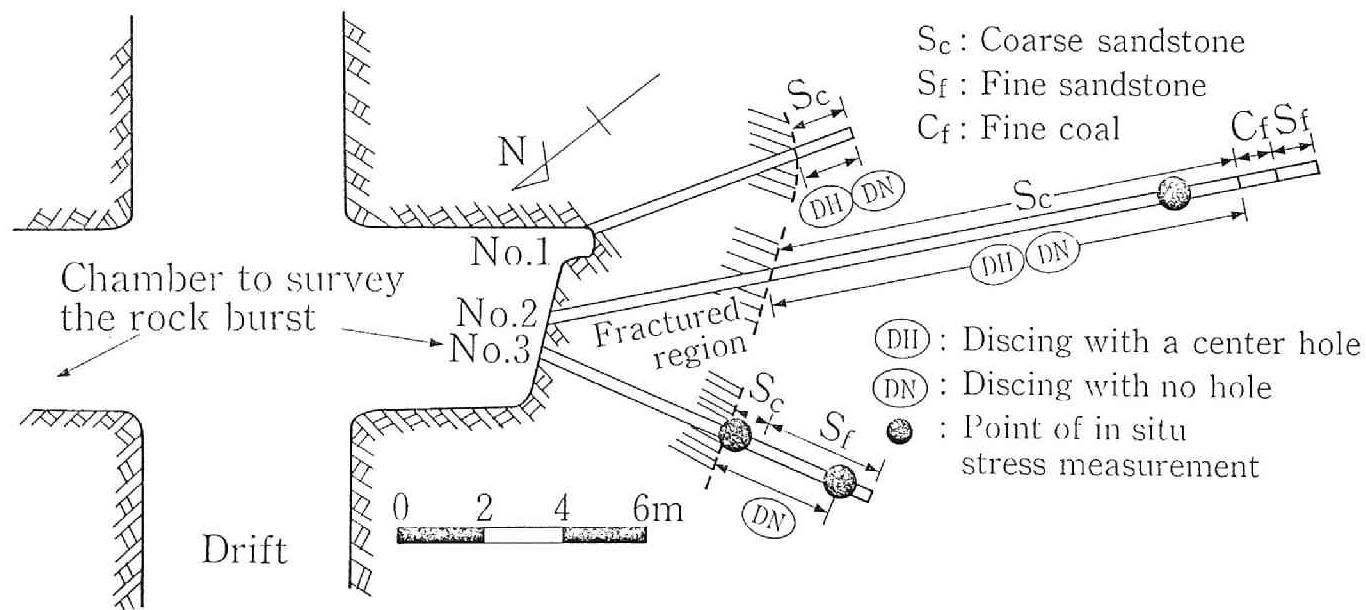


図2-15. 幌内炭鉱調査地点のボアホールの配置と岩種、コアディスクング現象の発生範囲と地圧測定位置

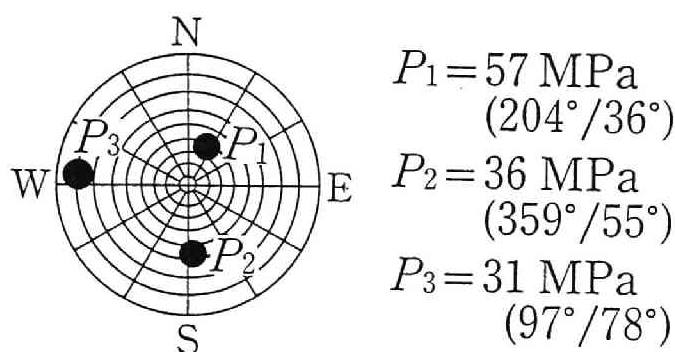


図2-16. 幌内炭鉱調査地点（コアディスキング現象発生地点）の地圧状態

地圧測定は、8素子ゲージによる孔底ひずみ応力解放法により行い、図中の3点で測定に成功した。これらの測定結果から決定したこの箇所の地圧状態を、図2-16に示す。主応力値は解析の載荷条件と対応させて圧縮を正とし、主応力方向はステレオネットの下半球投影法で示した。最大主応力は鉛直から 36° 傾いた方向から作用し、その値は岩盤密度を 2.6 g/cm^3 とした場合のかぶり圧 27 MPa の2.1倍にも達しており、これは採炭に伴う応力集中の影響と思われる¹⁴⁾。さて、この地圧状態をボアホール毎に示すと表2-2のようになる。表中 S_t はコアの圧裂試験により求めた岩石の引張強度であり、No. 1, No. 2ボアホールについては異常破砕の発生した粗粒砂岩の値を、No. 3ボアホールについてはその上盤の細粒砂岩の値を示している。

次に、現場で発生したコアディスキング現象を図2-14の発生条件と比較するため、地圧成分のうちボアホール軸に関する周圧 $P_r = (P_x + P_y) / 2$ とボアホール軸方向の成分 P_z に注目する。実際に現場で得られた中空コアの内外径比 D_i / D_o は $75 / 116 = 0.65$ であるが、図2-14に示した発生条件は $D_i / D_o = 0.50$ の場合に対して求めている。この内外径比の相違の影響を図2-13で検討すると、コアディスキングの発生に要する P_z の値にはあまり差はないが、 P_r の値は $D_i / D_o = 0.50$ の方が $D_i / D_o = 0.65$ の場合より1.42倍程度大きいことがわかる。そこで表2-2に示すように、 P_r を引張強度 S_t で除した P_r / S_t に補正係数として k

表 2-2. ボアホール毎の応力成分、および、それらに基づく理論解析結果からみた
コアディスキング現象の発生の有無の判定と実際の発生状況の比較

Borehole	No. 1	No. 2	No. 3
Direction	N163°W	N153°W	N118°W
Elevation	5°	6°	5°
Rock	Coarse sandstone	Coarse sandstone	Fine sandstone
S_t (MPa)	7	7	9
P_x (MPa)	31	31	36
P_y (MPa)	49	48	49
P_z (MPa)	44	44	38
P_{xy} (MPa)	2	1	-5
P_{yz} (MPa)	-10	-11	-10
P_{zx} (MPa)	-1	1	6
$*k \cdot P_r / S_t$	8.1	8.0	6.7
P_z / S_t	6.3	6.3	4.2
Discing with a center hole			
Analysis	○	○	○
(Observation)	(○)	(○)	(○)
Discing with no hole			
Analysis	×	×	×
(Observation)	(○)	(○)	(×)

$$* P_r = (P_x + P_y) / 2$$

$$k = 1.42 \text{ (correction factor on } D_i / D_o \text{)}$$

○ : Occurrence

× : No occurrence

= 1.42 を乗じ、この補正後の値を P_r/S_t の値とみなして図 2-14 上に□印でプロットした。これをみると、いずれのボアホールでも中空コアのコアディスキング現象が発生することを示しており、中空コアについては、解析結果と観察結果は完全に一致する。一方、通常のコアについては、いずれもコアディスキング現象が発生しない地圧条件になっており、No. 1 及び No. 2 ボアホールでの発生と矛盾する。しかし、これらの地圧状態は、 P_r/S_t や P_z/S_t の値が 3~4 割増減すれば通常コアの発生条件を満たすため、通常のコアのコアディスキング現象の発生については、かなり微妙な地圧条件にあったのではないかと推測される。従って、図 2-14 のコアディスキング現象の発生条件は定量的には多少相違のあるものの、実際の現場のコアディスキング現象の発生と概ね一致し、今後は逆にこの発生条件を用いて初期地圧状態の傾向を推定することが可能といえよう。

2. 4. 結言

高い地圧場における初期地圧推定法として、中空コアのコアディスキング現象に注目し、その発生機構とこの現象が発生する地圧条件を検討した。その結果、次のことが明らかとなった。

(1) 中空コアのコアディスキング現象は、小口径ボアホールの外側を大口径でオーバーコアリングする際、大口径ボーリングの刃先が一定の深さにまで進入するたびに生じる。

(2) 中空コアのコアディスキング現象は、通常のコアディスキング現象より発生しやすい。

(3) 中空コアのコアディスキング現象の破壊は、中空コアの大口径ボーリング刃先側に生じる引張応力が主要な原因と考えられ、その発生には P_z 载荷の影響が最も大きい。従って、ボアホール軸方向の地圧成分が大きい場合に中空コアのコアディスキング現象が発生しやすい。

(4) 中空コアのコアディスキング現象の発生条件は中空コアの内外径比によって異なり、内外径比が大きいほど、つまりコアが薄肉になるほど発生しやすく

なる。

(5) 中空コアのコアディスクング現象が発生する地圧条件を理論解析により求め、その妥当性を確認するため、コアディスクング現象が実際に発生した炭鉱の重圧箇所での地圧測定を行った。その結果、筆者の求めた発生条件は概ね妥当であることが明らかとなった。

(6) 中空コアのコアディスクング現象の発生機構と発生条件に関する以上の検討の結果、中空コアのコアディスクング現象が高い地圧場における初期地圧推定法として有用であり、筆者の求めた発生条件を用いて、初期地圧状態の傾向を推定できることがわかった。

参考文献

- 1) 石田毅, 斎藤敏明: 中空コアのコアディスクング現象に関する研究, 資源・素材学会誌投稿中
- 2) Jeager, J.C. and Cook, N.G.W.: Pinching-off and diskings of rocks, J. Geophys. Res., Vol.68, No.6, pp.1759-1765 (1963)
- 3) Obert, L. and Stephenson, D.E.: Stress conditions under which core discing occurs, Trans. SME, AIME, Vol.232, pp.227-235 (1965)
- 4) Durelli, A.J., Obert, L. and Park, V.J.: Stress required to initiate core discing, Trans. SME, AIME, Vol.241, pp.269-276 (1968)
- 5) 菅原勝彦, 亀岡美友, 斎藤敏明, 岡行俊, 平松良雄: コアディスクング現象に関する研究, 日本鉱業会誌, 94巻, 1089号, pp.797-803 (1978)
- 6) Stacey, T.R.: Contribution to the mechanism of core discing, J. S. Afr. Inst. Min. Metall., Sep. 1982, pp.269-274 (1982)
- 7) 小林良二, 杉本文男: コアディスクングに関する実験的研究, 日本鉱業会誌, 99巻, 1143号, pp.359-364 (1983)

- 8) 川股重也: Finite Element Method による回転体の非軸対称荷重問題の解析, コンピューター使用による構造解析講習会テキスト, 日本鋼構造協会, pp. 242-256 (1968)
- 9) 岡行俊, 平松良雄, 斎藤敏明, 菅原勝彦: 岩盤応力決定のためのボアホール底面ひずみ測定による応力解放法の研究(第1報), 日本鉱業会誌, 92巻, 1055号, pp. 1-6 (1976)
- 10) Fairhurst, C.: On the validity of the 'Brazilian' test for brittle materials, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.1, pp.535-546 (1964)
- 11) 岡行俊, 平松良雄, 斎藤敏明, 菅原勝彦: 岩石の静的破壊の機構, 昭和45年度日本鉱業会秋季大会分科研究会資料K-1 (1970)
- 12) 菅原勝彦: 岩石の引張強さに関する統計学的研究, 熊本大学工学部研究報告, 25巻, 3号, pp. 123-130 (1976) pp. 100-101 (1973)
- 13) Zhu, W., Li, G. and Wang, K.: Analyses of diskling phenomenon and stress field in the region of an underground powerhouse, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.18, No.1, pp.1-15 (1985)
- 14) 石田毅, 斎藤敏明: 岩石突出現象解明のための現場における基礎調査, 昭和55年度日本鉱業会春季大会研究業績発表講演会講演要旨集, pp. 153-154 (1980)

第3章 初期地圧の測定例とその結果に見られる特徴的な傾向

3.1. 緒言

第1章では、初期地圧状態に関する従来の研究を概観したが、初期地圧状態についての一般的な理論は現在のところ未だ確立されていない。また、我が国の初期地圧状態はその地学的環境から諸外国と比べて特異な傾向にある可能性があるが、十分な調査が進められていない。さらに、初期地圧状態の評価を行ううえで、造構応力や地形など初期地圧状態に影響を及ぼす諸要因に関する検討が必要であるが、これらについても必ずしも十分に研究が行われているとはいえない。このように未だ十分に解明されない問題が数多く残されている現状で初期地圧状態に関する研究を進めるためには、まず十分な精度を有する信頼性の高い方法で測定を行い、その結果に基づいて議論を行うことが重要である。第1章では種々の初期地圧測定法についても検討したが、応力解放法は3次元の初期地圧を求めるうえで、他の方法に比較して最も歴史も古く信頼性の高い測定法といえる。そこで筆者は、我が国で開発された応力解放法で多くの測定実績のある8素子ゲージを用いた孔底ひずみ法により、日本各地で初期地圧測定を行い、我が国の初期地圧状態の一般的な傾向を明らかにするための基礎データを得るとともに、初期地圧状態に影響を及ぼす諸要因を検討することにした。

さて、筆者が行った初期地圧測定の目的は、次の2種類に大別される。第1は地下空洞の安定性評価であり、具体的には地下発電所や長大トンネル空洞の設計、あるいは鉱山の採掘設計や炭鉱における岩盤や炭壁の異常破碎現象の解明などを目的としたものである。第2は、地震予知計画の一環として西日本の地殻の応力状態を調査することを目的としたものである。このように、種々の目的で初期地圧の測定を実施してきたが、得られた初期地圧状態にはある程度共通した主要な特徴が見られる場合が少なくない。そこで本章では、これらの初期地圧測定結果のうち、我が国の最も地下深い箇所での測定である佐々連鉱山の例や1本のトンネル沿いに谷、斜面および尾根地形の直下で測定を行った

関越トンネルの例など特徴的な5箇所の測定結果を選び、大きな水平地圧の存在が認められる測定例と、地形との関連が認められる測定例の2つに分類し、各測定箇所毎に初期地圧状態の特徴を詳しく検討する。

なお本章では、特に示す場合を除き、初期地圧測定結果を次のような方法で表示する。基本座標系を x , y , z として、 x 軸は水平北向きに、 y 軸は水平西向きに、 z 軸は鉛直上向きにとるものとする。従って、例えば σ_z は鉛直地圧（鉛直方向の直応力成分）を示すことになる。また主応力 σ_1 , σ_2 , σ_3 の方向は、ステレオネットの下半球投影法で示す。さらに必要に応じて水平方向に働く直応力の最大値 σ_{Hmax} , 最小値 σ_{Hmin} および σ_{Hmin} の方位を表示するものとする。なお、応力値は引張応力を正とする。従って、 σ_3 が3次元的な最大地圧、 σ_{Hmin} が水平方向の最大地圧となる。

3. 2 大きな水平地圧の存在が認められる初期地圧測定結果

初期地圧測定結果は測定地点毎に特徴的な傾向を有するが、水平地圧の方が鉛直地圧よりも大きな値を示す場合も少なくない。ここでは、このような大きな水平地圧の存在を示す例として、佐々連鉱山とA地下発電所における初期地圧測定結果について述べる。

3. 2. 1 佐々連鉱山における測定例

初期地圧測定は、各種地下空洞の安定性に関連して実施される他、地殻に作用している応力状態を知るために実施される。これは、地殻に作用している応力状態を明らかにすることが、地震予知に役立つと思われるからである。筆者は、地震予知研究の一環として、京都大学理学部地球物理学教室と共同で、西日本の地殻の応力状態の調査を行った。ここで述べる佐々連鉱山の例はそのような目的で行った初期地圧測定のひとつである。

佐々連鉱山は愛媛県伊予三島市の南東に位置し、三波川結晶片岩帯に属する緑色片岩を母岩とし、層理に整合的とはい胎した層状含銅硫化鉄鉱床（キースラー鉱床）を採掘していた。この地点は図3-1に示すように中央構造線

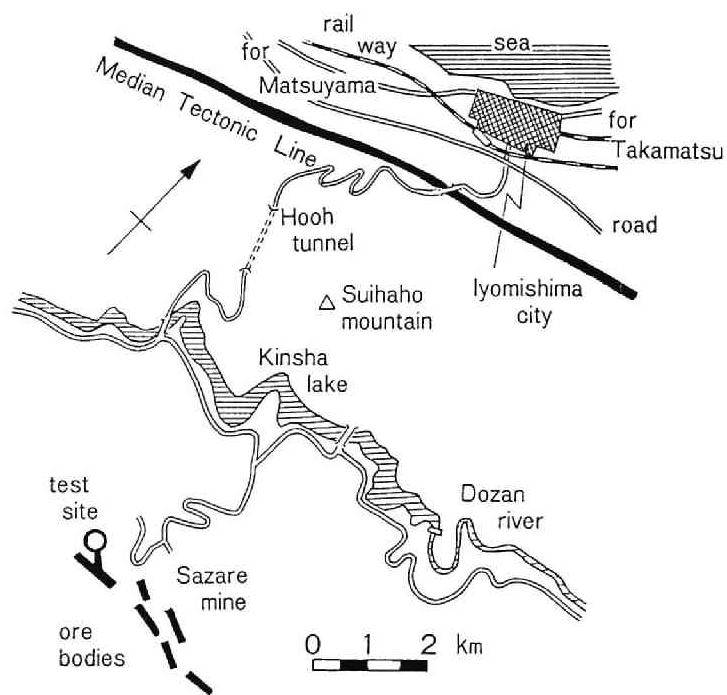


図3-1. 佐々連鉱山と中央構造線の位置

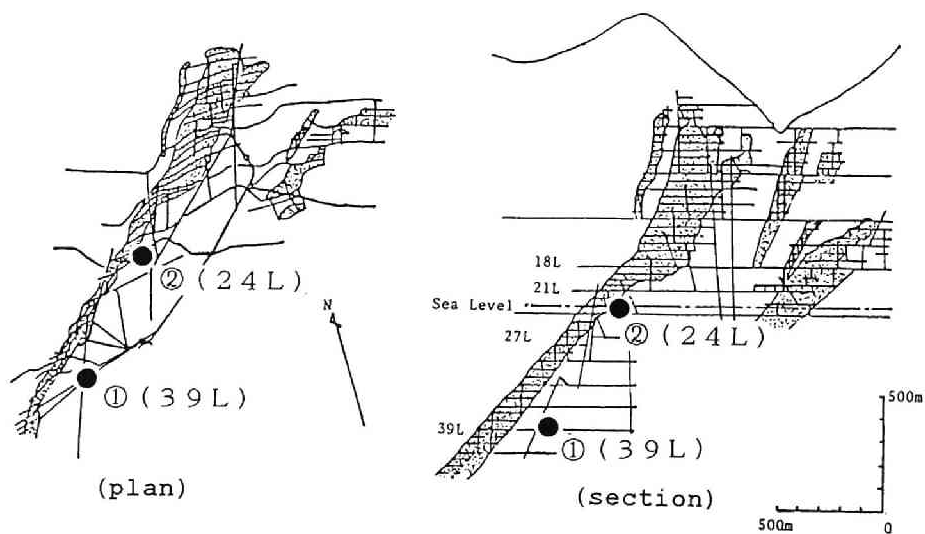


図3-2. 佐々連鉱山の探掘跡と測定位置(①, ②)の関係

の南方約8 kmに位置する。地殻の応力状態を知るためには言うまでもなく地下深部での測定が望ましい。この点、佐々連鉱山は初期地圧測定を実施した直後の昭和54年10月に閉山したが、測定当時我が国で最も深いところで採掘を行っていた金属鉱山であった。初期地圧測定は地表下1564 mと1219 mの2地点で実施したが、このような地下深部での初期地圧測定は少なくとも我が国では他に例を見ない。従って、我が国における地殻応力状態を明らかにするうえで、当地点での測定結果は重要な意味をもつものと思われた。さらに、深度が異なる2地点で測定を行えることから、同一箇所における深度による初期地圧の変化をも明らかにすることが期待された。

図3-2に採掘跡と測定地点の関係を示す。測点①は佐々連鉱山の39番坑(39L)にあり、海拔-544 m、地表下1564 mに位置する。また測点②は、24番坑(24L)、海拔-44 m、地表下1219 mに位置する。また、測点①は採掘跡から約150 m、測点②は約100 m離れている。稼行鉱床は厚さ1~5 mの板状鉱床で、採掘による空洞は比較的小規模であるので、測定を実施した2地点の地圧は採掘による影響をほとんど受けておらず、初期地圧状態にあるものと思われた。

測点①(39L)では、図3-3に示すようにボアホールを2本削孔し、ボアホールNo. 1で6回、ボアホールNo. 2で5回測定を試み、ボアホールNo. 1では1-3, 1-4, 1-6の3回、ボアホールNo. 2では2-4, 2-5の2回初期地圧の測定に成功した。これらの測定結果から図3-4に示す初期地圧を決定した。一方、測点②(24L)では図3-5に示すように、2本のボアホールで各4回ずつ測定を試み、3-1, 3-2, 3-4, 4-1, 4-3の計5回の測定に成功し、図3-6に示す値をこの地点の初期地圧とした。

なお、コアディスキング現象は測点②(24L)のボアホールNo. 3の孔口から3.0~3.2 mの間で通常のコアに対するコアディスキング現象が見られた以外、全く発生しなかった。当地点のボーリングコアの引張強度は測定しなかったが、一軸圧縮強度はボアホールNo. 1, 2, 4では200 MPa、

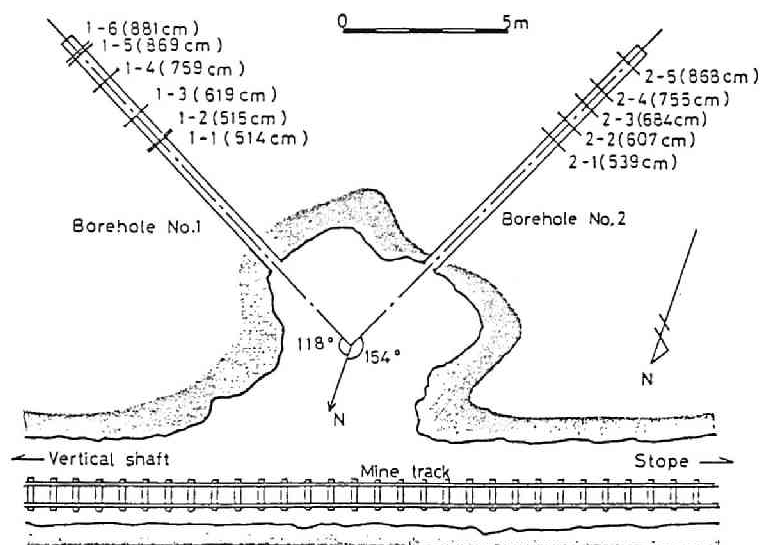
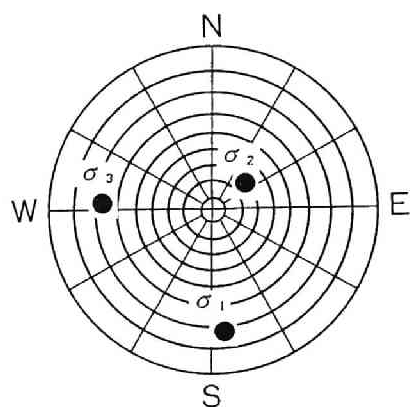


図3-3. 測点①(39L)のボアホール配置と測点



$$\sigma_1 = -11.8 \text{ MPa} (356^\circ / 72^\circ)$$

$$\sigma_2 = -25.4 \text{ MPa} (231^\circ / 28^\circ)$$

$$\sigma_3 = -51.9 \text{ MPa} (93^\circ / 68^\circ)$$

$$\sigma_z = -27.9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{H\max} = -13.1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{H\min} = -48.0 \text{ MPa}$$

$$(N 89^\circ W)$$

図3-4. 測点①(39L)の初期地圧測定結果

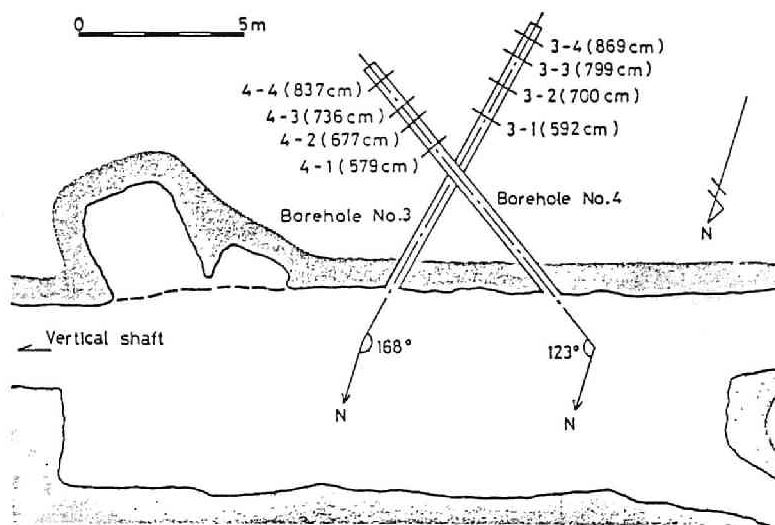
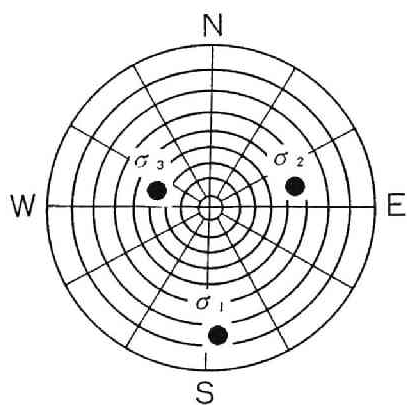


図3-5. 測点②(24 L)のボアホール配置と測点



$$\sigma_1 = -6.1 \text{ MPa } (355^\circ / 75^\circ)$$

$$\sigma_2 = -21.9 \text{ MPa } (255^\circ / 55^\circ)$$

$$\sigma_3 = -36.4 \text{ MPa } (104^\circ / 38^\circ)$$

$$\sigma_z = -29.9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{H\max} = -7.4 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{H\min} = -27.0 \text{ MPa}$$

$$(N 90^\circ W)$$

図3-6 測点②(24 L)の初期地圧測定結果

No. 3では他より小さく130MPa程度である。引張強度が一軸圧縮強度の1/10であると仮定し、表2-2に示したのと同じ方法で理論的にコアドィスキング現象の発生の有無を調べると、いずれのボアホールでも初期地圧状態はコアドィスキング現象の発生条件を満たしておらず、現場の観察結果と一致する。このように地表下1000mを越える地下深部にもかかわらず、コアドィスキング現象がほとんど発生しなかったのは、初期地圧の大きさに比較して岩盤の強度が大きかったためと思われる。一方、ボアホールNo. 3では、強度が他のボアホールに比べて小さかったため、測定横坑の存在のため地圧状態が初期地圧よりも高い状態になっている横坑周辺の応力集中域でコアドィスキング現象が発生したものと思われる。

測点①(39L)と測点②(24L)を結ぶ方向の地形断面図と測点の位置を示すと図3-7のようである。また、測点①と②を通る東西、南北方向の地形断面図をそれぞれ図3-8、9に示す。さて、測定結果の鉛直地圧 σ_z を見ると、測点①では27.9MPa、測点②では29.9MPaである。測点②のかぶり圧は、岩盤の密度を 2.6 g/cm^3 と仮定した場合、かぶり深さが1219mであるから32.3MPaとなり、測定結果はほぼこの値に一致する。しかし、測点①(39L)の σ_z の値はかぶり深さで345m浅い測点②の値とほぼ同じであり、測定箇所直上の地形の起伏を考慮してもやや小さすぎる。従って、測点①の初期地圧は、測定箇所周辺の不均質な地質状態などにより、佐々連鉱山のこのレベルの平均的な初期地圧状態よりもやや小さい値となっている可能性がある。

一方、以上の測定結果に示された佐々連鉱山の初期地圧状態の特徴は、大きな水平地圧の存在である。3次元的な最大地圧 σ_1 の方向に着目すると、測点①、測点②ともに、東方の水平よりやや上方から大きな地圧が作用していることがわかる。図3-8及び図3-9の地形の東西断面図を見ると、測点①②ともに東から西に落ちる傾斜地の地下に位置していることがわかる。しかし、この地形だけで大きな水平地圧を説明することは不可能である。

測点①、②の水平方向の最大地圧 σ_{Hmin} および最小地圧 σ_{Hmax} の値を見ると、

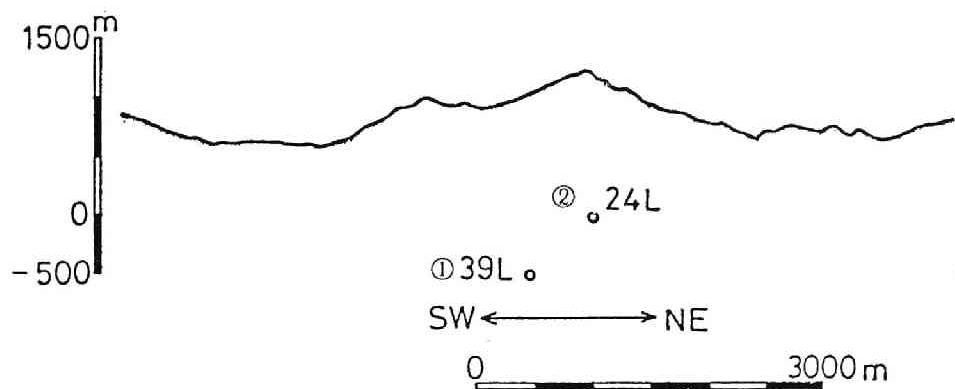


図3-7 測点①(39L), ②(24L)とこれらを通る地形断面図

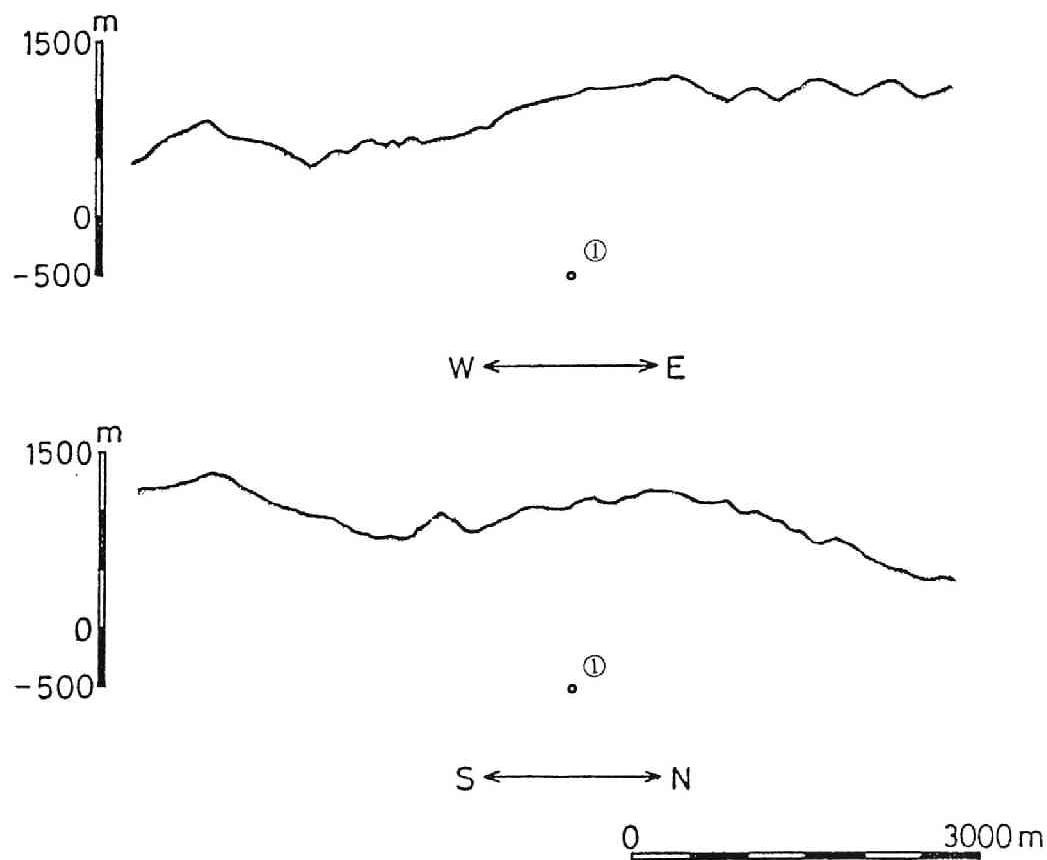


図3-8. 測点①(39L)とこれを通る東西と南北方向の地形断面図

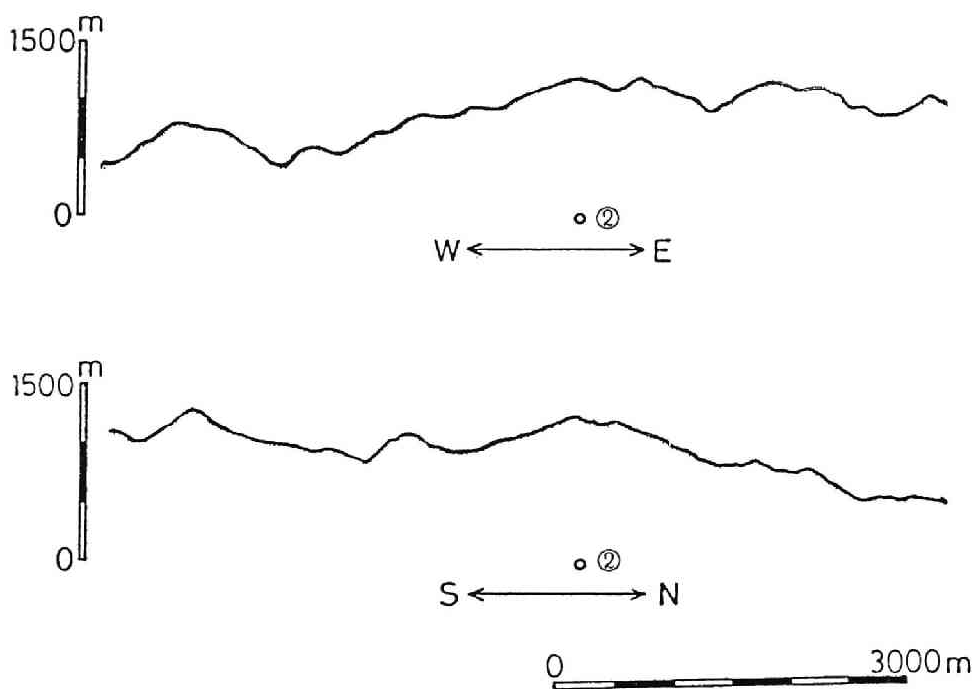


図3-9. 測点②(24L)とこれを通る東西と南北方向の地形断面図

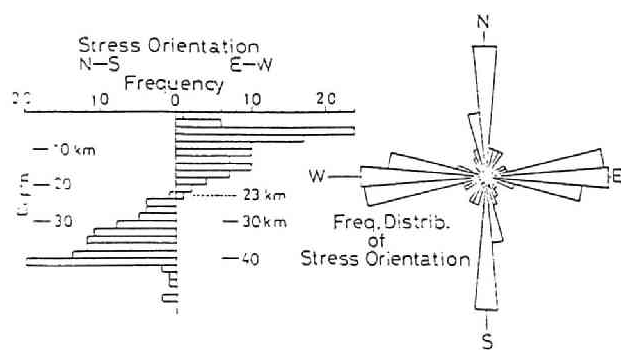


図3-10. 岡野らによる四国地方の起震応力¹⁾

2つの測点の測定結果の傾向は極めて良く一致していることがわかる。すなわち、どちらの測定結果も $\sigma_{Hmax}/\sigma_{Hmin}=0.27$ と σ_{Hmin} は σ_{Hmax} の4倍近い大きい値をとり、またその方向はともに東西方向である。図3-10は、岡野ら¹⁾による、四国地方で発生した地震の起震応力の方向であるが、これによれば、深さ22~23kmを境にして、それより深いところで発生する地震は南北方向の圧縮応力で発生するが、それより浅いところで発生する地震は東西方向の圧縮応力で発生することを報告している。一方、中根が²⁾³⁾一等三角点の10個近い三角網の測定結果を平均して求めた、この地域のやや広い範囲の定常的な水平地殻ひずみの主圧縮方向は北西-南東方向であり、今回の初期地圧測定結果の σ_{Hmin} が示す東西方向と45°程度の違いがある。しかし、原田らが⁴⁾示した佐々連鉱山を含む1個の三角網の水平主圧縮方向は東西方向を示しており、初期地圧の測定結果と一致する。これらのことから、測定結果に見られる東西方向の大きな水平地圧は、地殻の応力状態を反映したものと思われる。

以上の検討結果を踏まえて、とくに最大地圧 σ_v の方向に着目して測定結果を見直すと、測点①、測点②の初期地圧は、この地域に作用するほぼ水平な東西圧縮応力の影響とともに、東から西に落ちる地形の影響を受けたものと考えることができる。さらに、測点②の測定結果は測点①のそれより、 σ_v の方向がより鉛直に近くなっているが、これは測点②は測点①より地表に近い分だけ造構応力の水平東西方向の圧縮力を受けにくく、相対的に岩盤の自重によるかぶり圧の影響が大きく表れているものと考えることができよう。

すでに述べたように、佐々連鉱山は中央構造線の近傍に存在する。前述の四国地方の起震応力の方向が深さによって異なる現象や、初期地圧の測定結果に見られる東西方向の水平地圧は中央構造線の影響を受けている可能性がある。しかし、初期地圧測定結果は、その影響をも含んだこの地域の地殻ひずみや地殻の浅いところで発生する地震の起震応力の状態と一致している。従って、初期地圧を現場で測定することなく推定する場合には、その地域の地質構造線の有無にかかわらず、地殻のひずみや地震の起震応力の状態が十分参考になることがうかがえる。

3 2. 2. A地下発電所における測定例⁵⁾

岐阜県北部に建設が予定されているA地下発電所の地下空洞は、幅18.5m、長さ116m、高さ40.5mで揚水式の発電所であり、250MWの発電機4基が設置され合計出力1000MWが予定されている。初期地圧測定は、地下発電所空洞の設計に資することを目的として、地下発電所建設予定地周辺に掘削された地質調査用横坑内に2本のボアホールを掘削して行った。測定地点は海拔450mに位置し、地表面までのかぶり圧は335mである。また、岩盤は堅硬ち密な流紋岩からなっている。

測定結果を図3-11に示す。最大主応力（最小地圧） σ_1 は圧縮で他の2つの主応力に比べてその値は小さく、測定点の初期地圧は2軸的な圧縮応力状態にあることがわかる。大きな値を示す2つの主応力のうち、最小主応力（最大地圧） σ_3 はほぼ水平東西方向を示し、中間主応力 σ_2 はほぼ鉛直である。測定深度と岩盤の密度から推定されるかぶり圧は8.9MPaであるので、中間主応力 σ_2 はこのかぶり圧に起因するものと思われる。さて、測定箇所周辺

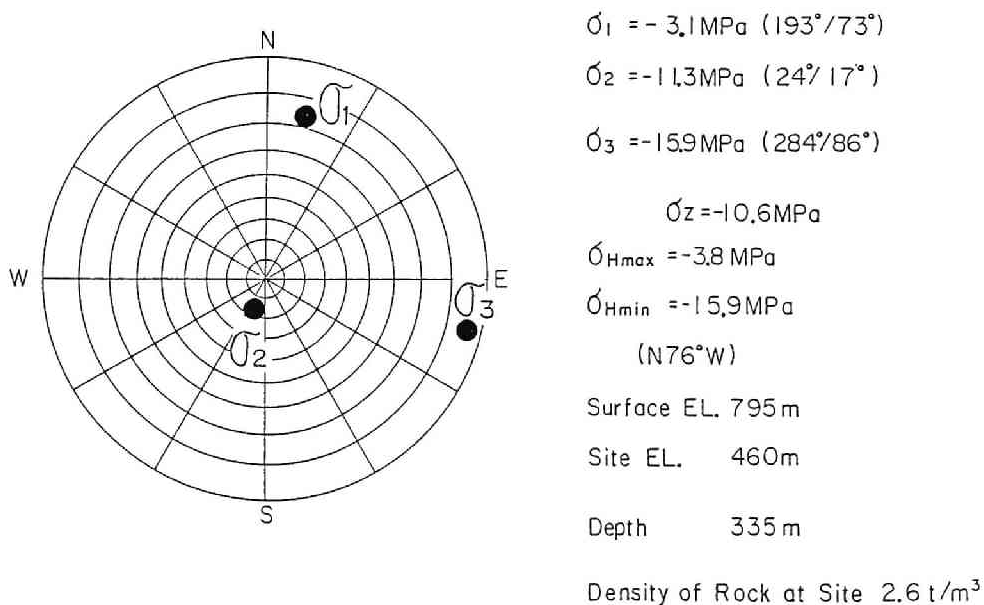


図3-11. A地下発電所地点の初期地圧測定結果

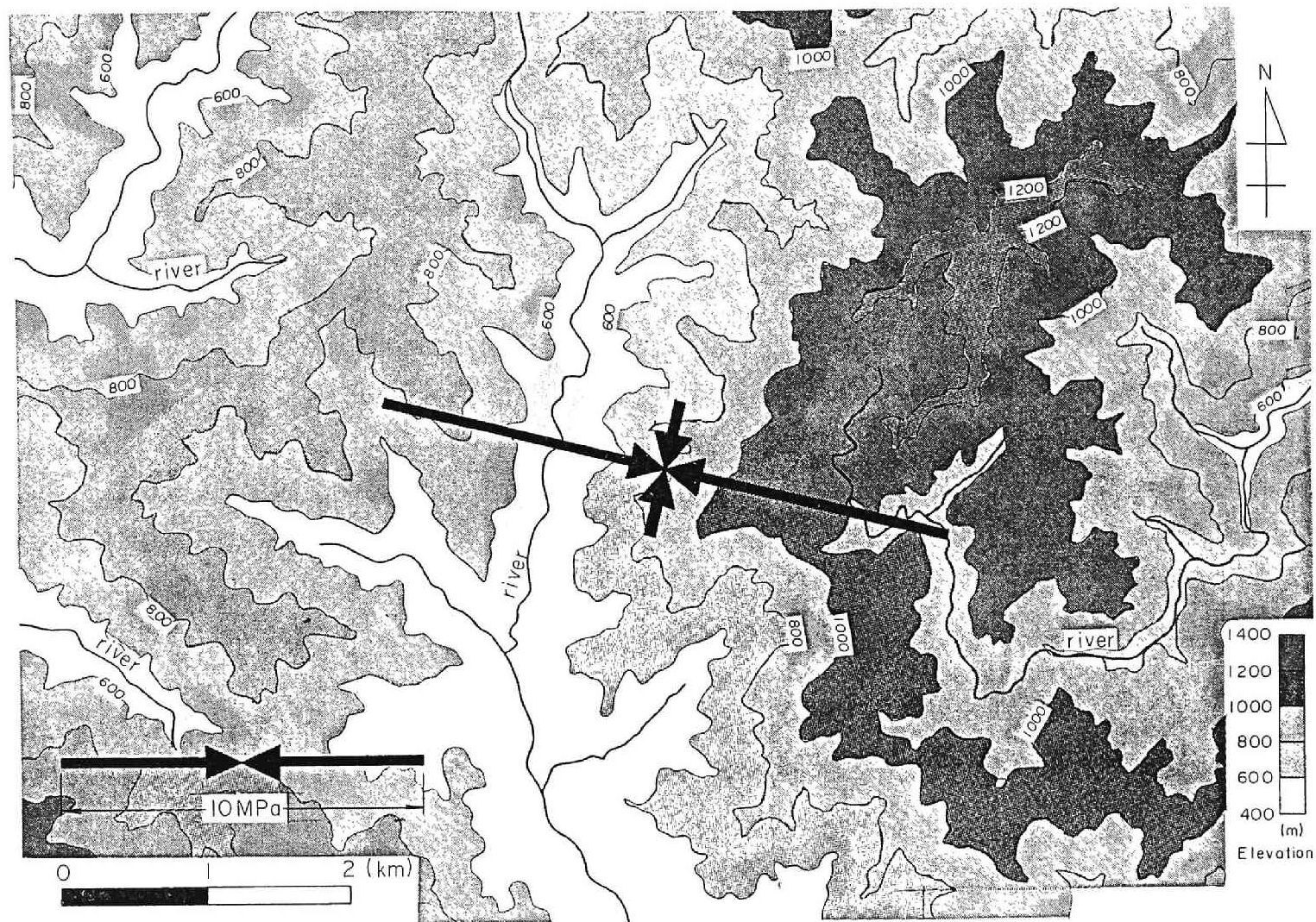


図3-12. 測定箇所周辺の地形図と測定結果における水平方向の最大 最小地圧の方向と大きさ

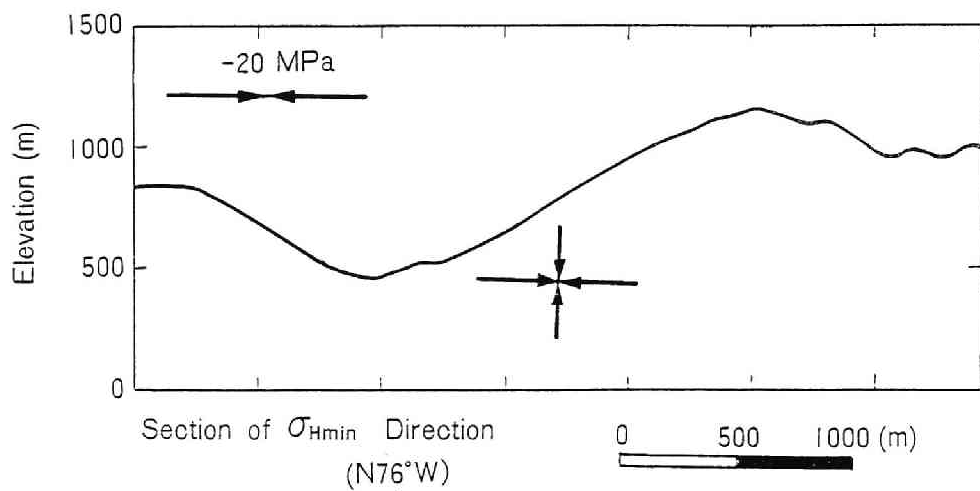


図 3-13 最大水平地圧 σ_{Hmin} 方向の地形断面図とこの断面内での地圧状態

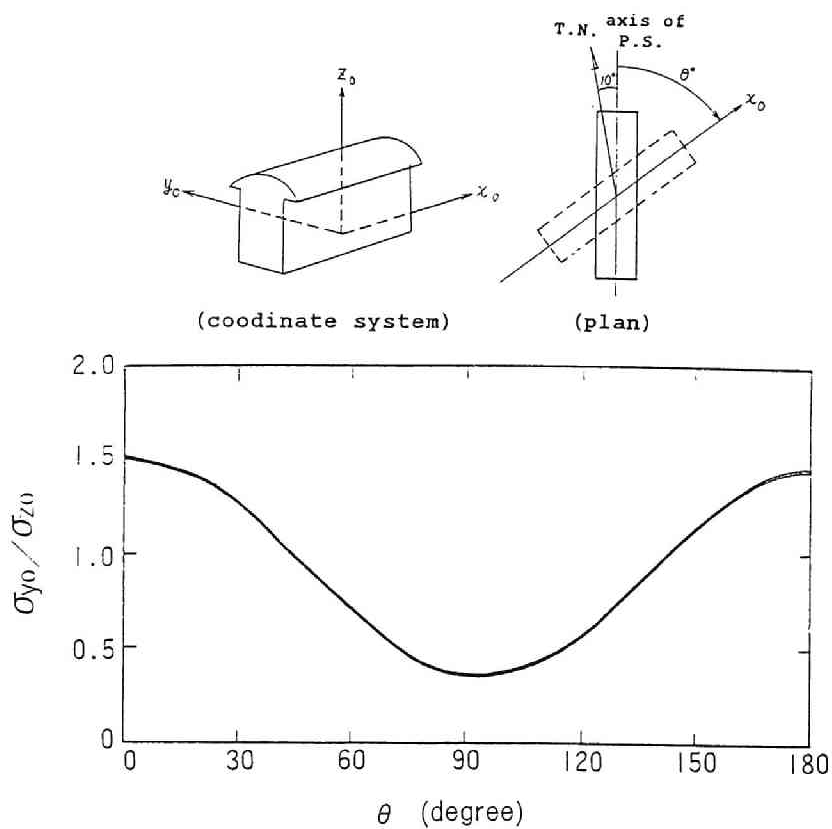


図 3-14 地下発電所空洞の長手軸方向を変化させた場合の側圧比の変化

の地形図と測定結果における水平方向の地圧状態を図3-12に、水平方向の最大地圧 σ_{Hmin} の方向の地形断面図とこの断面内での地圧状態を図3-13に示す。これらの図から、測定地点は急峻な山岳地帯の傾斜面に近い地下に位置しており、測定結果に見られる東西方向の大きな水平地圧は、周囲の地形の影響だけでは説明できない。この東西方向の水平地圧は、他の地点の初期地圧測定結果や一等三角点の測量による広範囲かつ長期間にわたる地表の平均的な水平ひずみ⁶⁾⁷⁾、あるいはこの地域で発生する地震の初動分布から解析される起震応力の方向や付近の活断層の方向と変位状態⁸⁾などから、日本列島の地殻変動に起因する造構応力の影響と推定される。このように、造構応力は初期地圧状態に大きな影響を及ぼすため、その影響については第5章で詳しく検討する。

さて、このような初期地圧の測定結果と地下発電所空洞の長手軸との関係を図3-14に示す。地下発電所空洞の長手軸は、当時 $N10^{\circ}E$ に予定されていたが、この長手軸の方向は測定結果から見た側圧比 σ_y/σ_z が最も大きくなる方向に近く、地下空洞の安定に不利な方向と考えられた。発電所の長手軸の方向については、初期地圧状態（側圧比）やそれに基づく空洞隅部の応力集中、岩盤強度、岩盤節理の卓越方向および全体の機器配置などを勘案して、総合的に有利な方向に決定する必要があるが、側圧比から見る限り、長手軸を $70^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 程度回転させる方がより望ましいと思われた。なお、この地点では、電力中央研究所の埋設型ゲージによる測定も同時に実施され、8素子ゲージによる測定結果との相互比較や、初期地圧の岩盤内での分布が岩質や地質によりどのように影響を受けるかについて検討を加えた。これらのうち岩質・地質の影響については第5章で詳細に述べる。

3.3. 初期地圧測定結果と地形との関連

初期地圧測定結果を詳細に検討すると、測定地点周辺の地形が測定結果に影響を与えていると思われる場合が少なくない。ここではそのような例として、1本のトンネル沿いに谷、斜面および尾根地形の直下で測定を行った関越トンネル、同一レベルの坑道沿いにかぶり深さの異なる2地点で測定を行った明延

鉾山、並びに比較的地表に近い地点で測定を行った平木鉾山での測定結果について述べる。

3. 3. 1. 関越トンネルにおける測定例

関越トンネルは、群馬県水上町と新潟県湯沢町を結ぶ、延長10.9kmの我が国最長の道路トンネルである。トンネルの標高は海拔600m程度であるが、途中標高2000m近い谷川岳を貫くためかぶりが1000mにも及ぶ区間が生じる。このかぶりの大きな区間にあたる、湯沢側坑口より4.3km付近から約1.1km区間の花こう閃緑岩中の掘削では、ほぼ全域にわたって、掘進中の切羽面から薄片状の岩塊が飛び出す山はね現象が発生した。この山はねは、発破直後よりも発破後浮き石などを落としている姑息中に多く発生した。これは破壊音とともに切羽の岩盤表面に亀裂が入る程度の小規模なものが多いが、規模の大きなものでは破壊が切羽面の約半分にも及ぶ場合があった。現場での観察から、この山はねの発生は、岩盤の節理の状態に密接な関係を有していることがわかった。すなわち、岩相が均質一様で、数本の規則的で顕著な密着した節理が発達しているような場合に山はねが多発した。このような岩盤の異常な破壊現象は、切羽の掘進作業に危険を及ぼすため、発生機構の解明と防止対策の確立が必要とされた。そこで山はね発生箇所と山はねが発生していない箇所での初期地圧測定を行い、初期地圧状態と山はねとの関係を調べた。

周辺の地形図とトンネル軸に沿った鉛直断面図を図3-15に示す。初期地圧測定は同一の標高でかぶりの異なる図中の3点で実施した。このうち、測定地点N○.2およびN○.3では山はねが発生している。また、測定地点N○.1, N○.2およびN○.3の地表からの深度はそれぞれ260m, 960mおよび920mであり、また測定地点直上の地形はそれぞれ、谷、斜面および尾根地形をなしている。測定の結果得られた初期地圧状態を図3-16に示す。また、図3-15には測定結果の3次元地圧成分から求めた水平方向の地圧状態及びトンネル軸を含む鉛直断面内の地圧状態を矢印で示した。測定結果を見ると、山はねの発生したN○.2およびN○.3地点の最大地圧 σ_3 は、山は

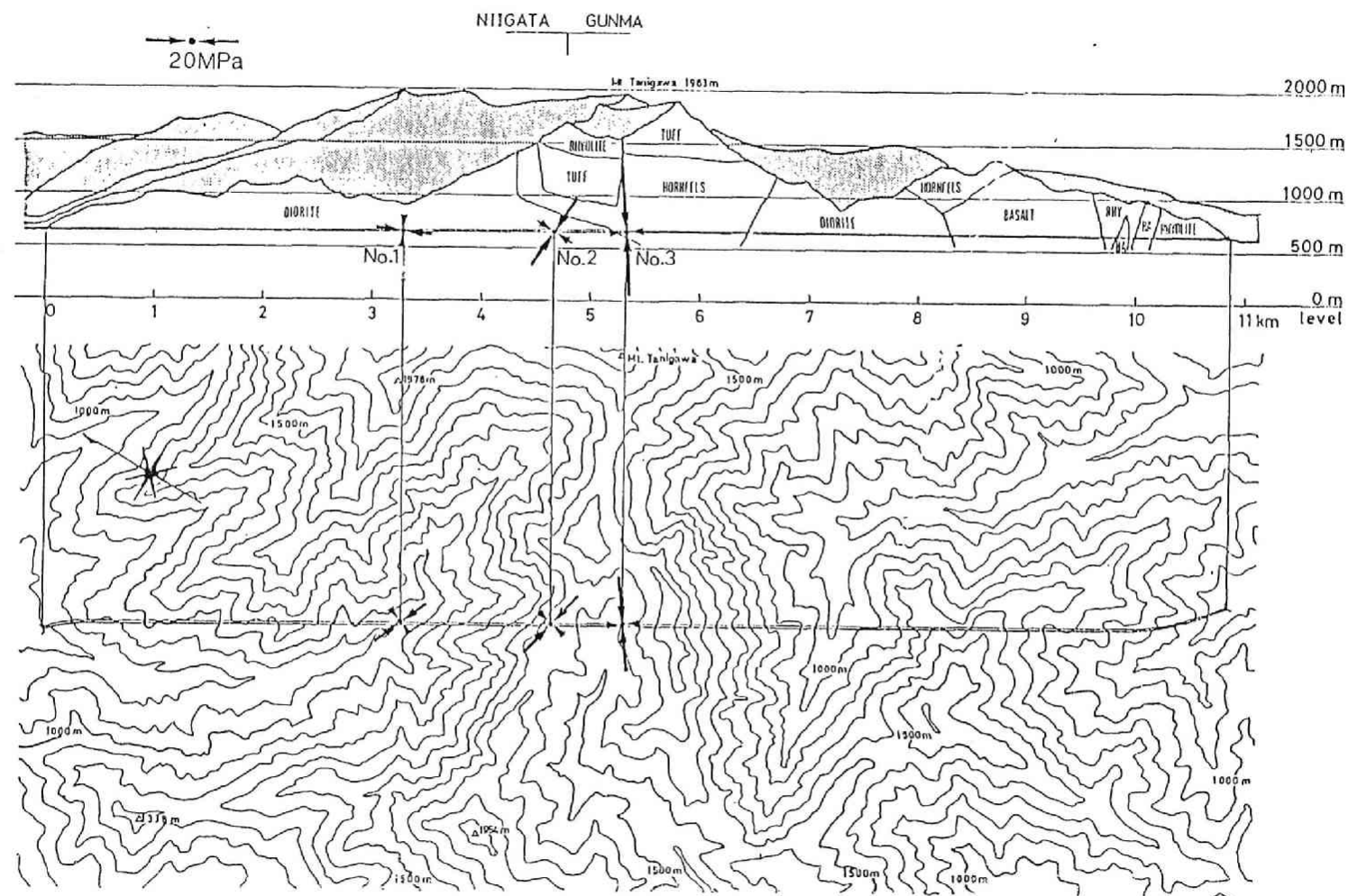


図3-15. 関越トンネル周辺の地形図、トンネル軸に沿った鉛直断面図と初期地圧測定結果

Point	No. 1	No. 2	No. 3	
Depth	260 m	960 m	920 m	
Stress Component	σ_x	-7.9 MPa	-8.1 MPa	-11.6 MPa
	σ_y	-12.6 MPa	-16.8 MPa	-17.0 MPa
	σ_z	-6.2 MPa	-16.4 MPa	-31.3 MPa
	τ_{yz}	-0.2 MPa	5.9 MPa	0.2 MPa
	τ_{zx}	-0.3 MPa	2.1 MPa	-2.1 MPa
	τ_{xy}	-3.6 MPa	-1.7 MPa	7.7 MPa
Principal Stress	σ_1	-5.9 MPa	-7.5 MPa	-6.0 MPa
	Azimuth	207°	3°	145°
	Dip	58°	79°	86°
	σ_2	-6.3 MPa	-10.7 MPa	-22.2 MPa
	Azimuth	32°	262°	235°
	Dip	32°	46°	82°
	σ_3	-14.6 MPa	-22.9 MPa	-31.6 MPa
	Azimuth	299°	104°	32°
	Dip	88°	47°	9°
Horizontal stress	σ_{Hmax}	-6.0 MPa	-7.7 MPa	-6.1 MPa
	Direction	N29° E	N11° E	N35° W
	σ_{Hmin}	-14.6 MPa	-17.1 MPa	-22.4 MPa
	Direction	N61° W	N79° W	N55° E

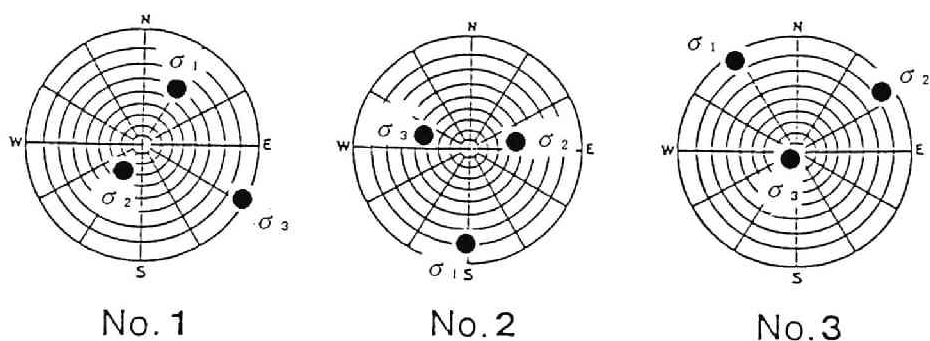


図 3-16. 関越トンネルにおける初期地圧測定結果

ねの発生しなかった No. 1 地点の σ_3 に比べて 1.5~2.0 倍の値を示し、またその方向も No. 1 では水平方向に近いのに対し、No. 2 および No. 3 では鉛直に近い状態になっていることがわかる。しかし、No. 2 と No. 3 の初期地圧状態は必ずしも一致しておらず、山はねの発生は初期地圧状態だけに関係するものではなく、岩盤内の節理の状態や岩質など岩盤の性質も大きく影響するものと思われた。

測定結果を山はねの発生との関連で見えてきたが、測定を行った3地点の直上の地形は、すでに述べたように、それぞれ谷、斜面および尾根地形をなしている。これらの地形と測定された初期地圧状態とはどのような関係にあるのであろうか。図3-15の鉛直断面内の最大地圧の方向に着目すると、谷地形直下のN o. 1では水平方向であった最大地圧の方向が、N o. 2では斜面に平行な方向を向き、さらに尾根直下のN o. 3ではほぼ鉛直方向になっていることがわかる。また、この最大地圧の大きさは、測定地点の地表からの深さが増大するにつれて増大している。これらのことから、このような初期地圧状態は地形の影響を少なからず受けているものと思われる。なお、このような、谷、斜面および尾根地形とその直下の初期地圧状態については、第5章で理論的に詳しく検討する。

3. 3. 2 明延鉾山における測定例

明延鉾山は兵庫県のほぼ中央部の養父郡大屋町に位置する。鉾山周辺の岩盤は、主に二畳紀の堆積岩類である舞鶴層群および貫入岩である夜久野複合岩類から構成されている。ここでの測定は、佐々連鉾山と同様、西日本の地殻の応力状態の調査を目的としたものである。初期地圧測定は、図3-17に示すように、6番坑(6L)の水平坑道沿いの2地点で実施した。測点①は南北に延びる尾根の直下にあり、地表からのかぶり深さは430m、海拔で218mの地点である。一方、測点②は谷の直下に位置し、地表からのかぶりは210m、海拔221mの地点である。このような2地点での測定は、関越トンネルの場合と同様、地形が初期地圧状態にどのような影響を与えるかを知るうえで興味もたれた。図3-18に、測点①②を含む北西-南東方向の地形断面図及び測点①、測点②をそれぞれ含む南西-北東方向の地形断面図を示す。測点①の岩盤は黒色塊状の粘板岩であり、石英と方解石の細脈を多く含み、へき開が発達している。測点②の岩盤は、部分的に強く珪化した斑れい岩からなっている。測点①②とも、採掘跡からはかなり離れているが、多くの断層が付近に存在するため、初期地圧状態はこれらの断層の影響を受けている可能性がある。また

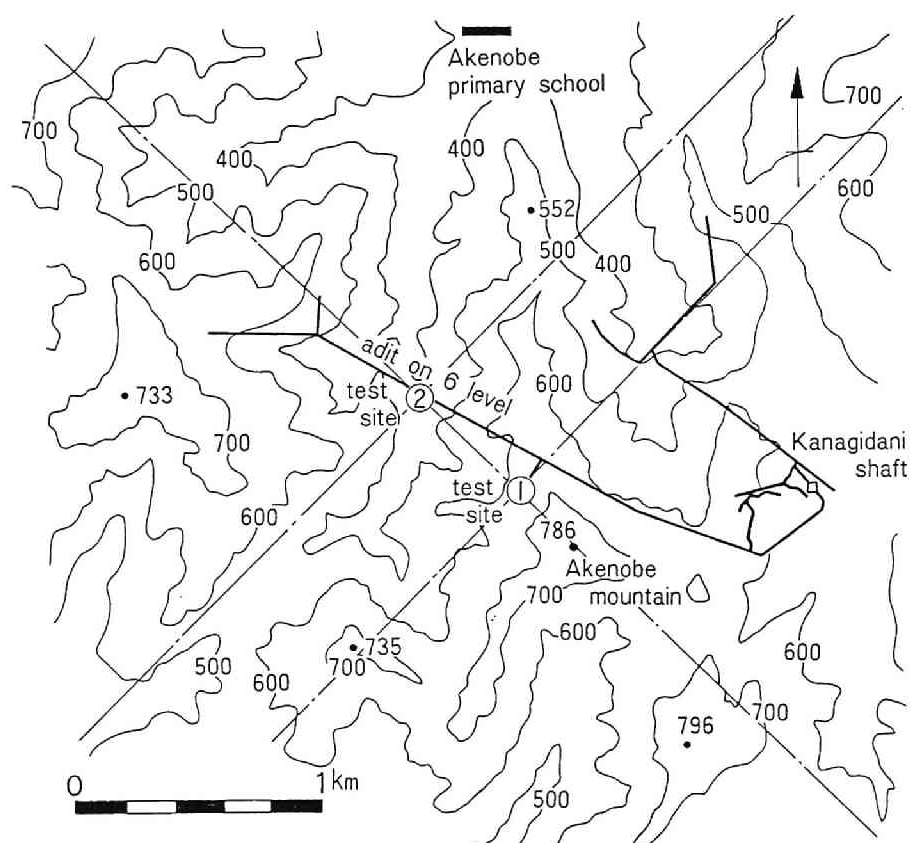


図3-17. 明延鉱山周辺の地形図と初期地圧測定位置
(一点鎖線は次図の地形断面図の断面)

測点①と②は水平に約500m離れている。

測点①では図3-19に示すように2本のボアホールで合計11回の測定を試み、1-2, 1-3, 1-4, 1-6, 2-1, 2-2, 2-3の7回の測定に成功した。これらの測定結果から求めたこの地点の初期地圧状態を図3-20に示す。この図より測点①の初期地圧は、最小主応力(最大地圧) σ_3 がほぼ鉛直に作用し、中間主応力 σ_2 は北西-南東方向に、最大主応力(最小地圧) σ_1 は北東-南西方向にいずれもほぼ水平に作用していることがわかる。測点①のかぶり圧は岩盤密度 ρ を $2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ とすれば、かぶり深さ h が430mであるから、 $\rho g h = 11.4 \text{ MPa}$ (g は重力加速度)と推察される。測定結果の鉛直地圧 σ_z は15.9 MPaであり、この推定値の

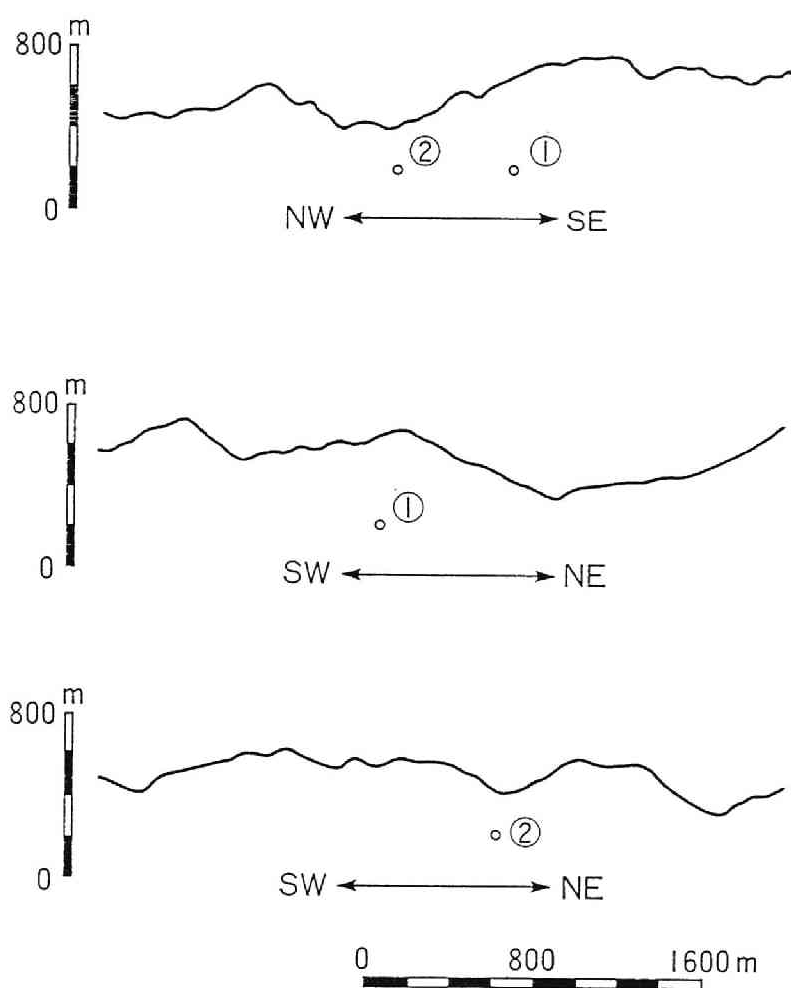


図 3-18. 明延鉦山の測点を含む地形断面図

1. 4 倍程度とやや大きな値となっている。また、水平方向の最大地圧と最小地圧の大きさはあまり差がなく、ともに 10 MPa 程度の値を示しており、この地点の初期地圧は水平方向にはほぼ等圧的な状態にあることがわかる。

次に測点②では、図 3-21 に示すように 2 本のボアホールで合計 8 回の測定を試みすべての測定に成功した。なお、ボアホール No. 4 は測定のため掘進を開始したところ岩盤状況が悪かったため放棄したものである。これらの測定結果から求めたこの地点の初期地圧状態は図 3-22 に示すようであり、最

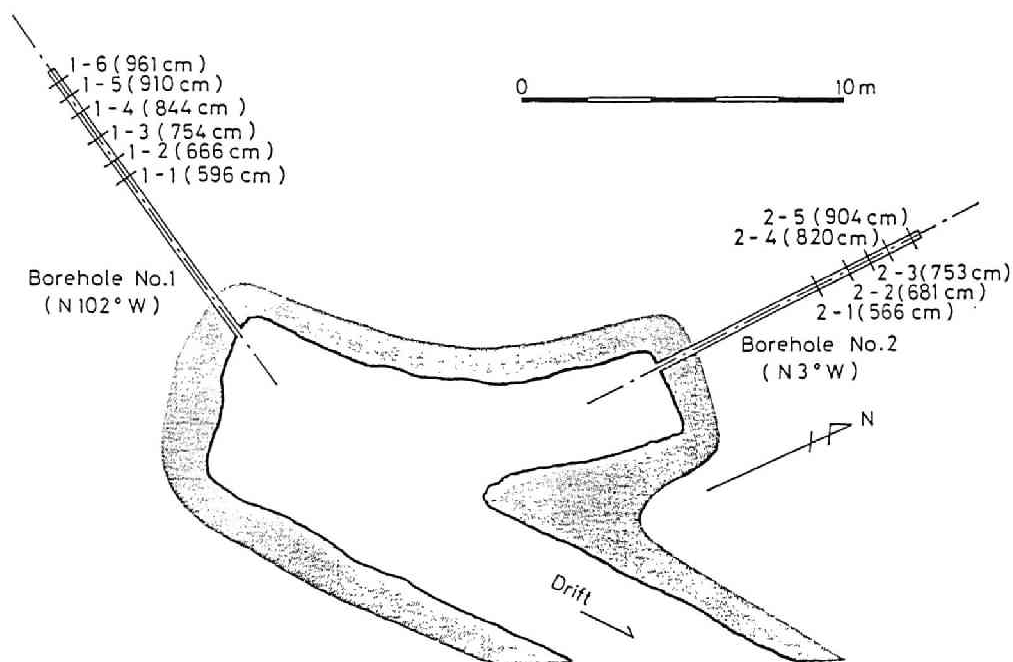
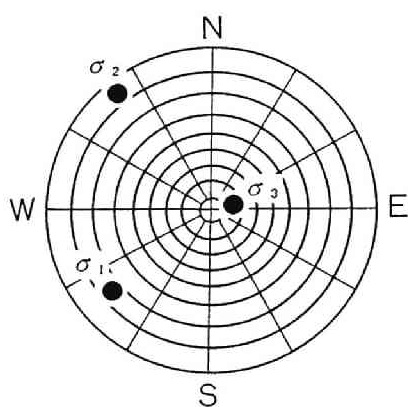


図3-19 測点①のボアホールの配置と測定位置



$$\sigma_1 = -8.8 \text{ MPa} (50^\circ / 75^\circ)$$

$$\sigma_2 = -11.1 \text{ MPa} (141^\circ / 84^\circ)$$

$$\sigma_3 = -16.4 \text{ MPa} (254^\circ / 16^\circ)$$

$$\sigma_z = -15.9 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{H\max} = -9.3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{H\min} = -11.2 \text{ MPa}$$

$$(N 45^\circ W)$$

図3-20 測点①の初期地圧測定結果

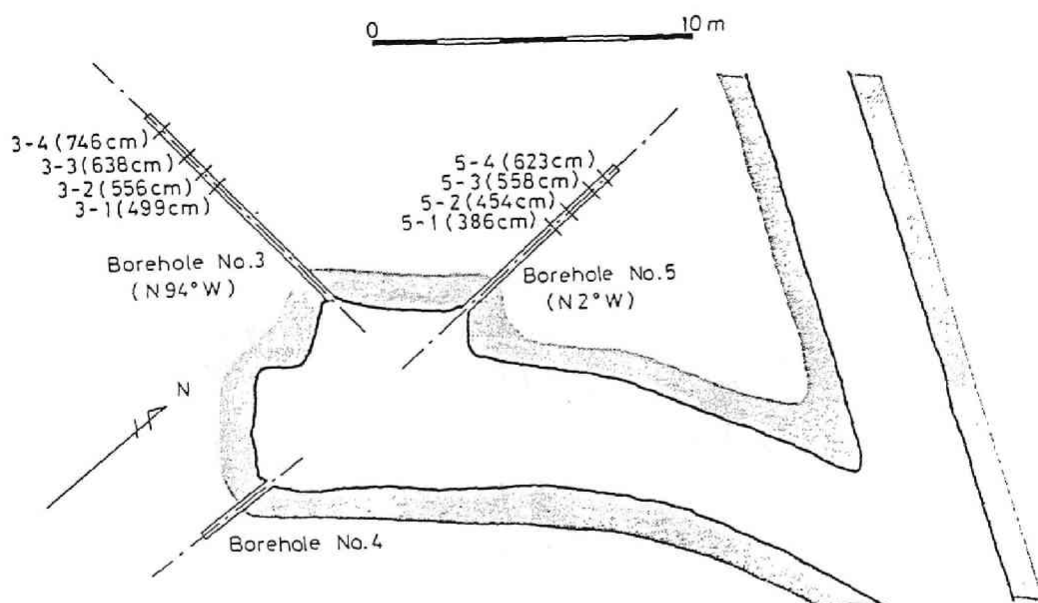
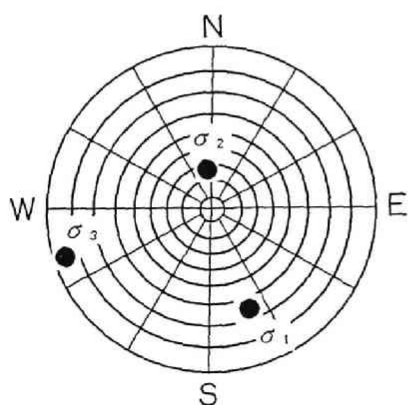


図 3-21 測点②のボアホールの配置と測定位置



$$\sigma_1 = -7.6 \text{ MPa} (339^\circ / 64^\circ)$$

$$\sigma_2 = -10.7 \text{ MPa} (172^\circ / 27^\circ)$$

$$\sigma_3 = -14.5 \text{ MPa} (71^\circ / 85^\circ)$$

$$\sigma_z = -10.1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{H_{\max}} = -8.1 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{H_{\min}} = -14.5 \text{ MPa}$$

$$(N70^\circ E)$$

図 3-22. 測点②の初期地圧測定結果

小主応力（最大地圧） σ_3 が東北東－西南西方向からほぼ水平に、中間主応力 σ_2 はほぼ鉛直に作用し、最大主応力（最小地圧） σ_1 は北北西方向水平面より 25° 程度上向きの角度から作用している。鉛直地圧 σ_z は 10.1 MPa であり、推定されるかぶり圧（ $\rho g h$ ） 5.6 MPa の約 1.8 倍となっている。また水平方向の最大地圧は最小地圧の 2 倍弱であり、その方向は $N70^\circ E$ である。

測点①、②ともに、測定結果の鉛直地圧 σ_z は、岩盤の密度 ρ と測定地点の地表からの深さ h から推定されるかぶり圧（ $\rho g h$ ）よりかなり大きな値を示した。初期地圧測定は、測定が容易かつ確実に行えるよう、破碎帯や断層を避け堅硬ち密な岩盤中で行うのが普通である。初期地圧状態に及ぼす岩質や地質の影響については第5章で実測値をもとに詳しく検討するが、このような堅硬ち密な岩盤は付近の脆弱な地山よりも耐荷力が高いから応力が集中しやすく平均よりも大きな初期地圧になっていることが予想される。測定結果の σ_z がかぶり圧（ $\rho g h$ ）より $1 \sim 2$ 割程度大きな値を示すことは他の地点の測定結果にもよく見られるが、今回の明延鉱山の場合、地質が複雑であるためこの傾向が強く現れたのではないかと思われる。さらに、鉛直地圧と予想されるかぶり圧の比 $\sigma_z / \rho g h$ を見ると、測点①では 1.4 、測点②では 1.8 と谷の直下にある測点②の方が尾根の直下にある測点①より大きな値を示している。谷の直下では周囲の傾斜地の地圧が作用するため、地表（谷）からの深さから予想されるよりも大きなかぶり圧が作用し、逆に尾根の直下では周囲の地形が尾根部より低いので、かぶり圧は地表（尾根）からの深さから推定されるよりも小さな値となるのであろう。従って、測点②の方が測点①より $\sigma_z / \rho g h$ の比が小さいのは、ある程度地形の影響の反映と考えることができよう。また、一定の水平圧縮応力の作用のもとで、尾根の直下の測点①では鉛直地圧 σ_z が大きくなるため最大地圧 σ_3 が鉛直に向き、一方谷の直下の測点②では σ_z が相対的に小さいため σ_3 が水平に向くと考えると、測点①と測点②の主応力の方向の違いもある程度地形の影響によるものと考えることができる。

測定結果から水平方向の地圧状態を見ると、測点①はほぼ等圧的で北西－南

東方向にやや強く圧縮される傾向があり、一方測点②は $N70^{\circ}E$ 方向に圧縮軸がある。明延鉱山周辺の断層、鉱脈、岩脈、しゅう曲などの解析によると、この地域の主要な断層のひとつである明延断層を境にして、東部では北東－南西方向の圧縮応力による割れ目の発達が支配的であり、一方西部では、全体としてはほぼ南北方向の圧縮応力の影響が大きいとされている⁹⁾。測点①②はともに明延断層の西側に位置するが、必ずしもこれらの初期地圧測定結果は南北方向の圧縮応力の卓越を示していない。上述の断層等の解析によれば主応力の方向が地域的に微妙に変化することが指摘されており、またこの解析の結果は断層や鉱脈などの割れ目の発生する瞬間の応力状態を示しているにすぎないことにも注意する必要がある。測定を実施した付近の地質は断層、しゅう曲などを多く含み複雑であり、初期地圧状態は場所により様々に変化すると思われる。従って、今回の測定においては、地形、かぶり深さ等の一般的な傾向を細かく解釈するのは難しく、より綿密な地質調査による断層解析等が必要と思われる。

3. 3. 3. 平木鉱山における測定例

神戸市六甲山地の北方、兵庫県加東郡社町の平木鉱山はカオリン質ろう石を産し、その鉱床は有馬層群の下部累層流紋岩と上部累層熔結凝灰岩とにはさまれている。ここでの測定も地殻の応力状態の調査を目的としたものであり、鉱石採掘跡の影響を受けていないと思われる下部累層流紋岩中で初期地圧測定を実施した。図3-23に平木鉱山周辺の地形図と初期地圧測定位置を示す。測定地点は当鉱山の30m坑、海拔210mの地点であり、地表からのかぶりは約110mである。測定に際しては、図3-24に示すように2本のボアホールを配置し、各ボアホールで2回ずつ計4回の測定を行った。

測定結果を図3-25に示す。この結果を見ると、最小主応力（最大地圧） σ_3 は鉛直から約 45° 傾き、その方向を水平面上に投影すれば北東－南西方向である。一方、中間主応力 σ_2 はほぼ水平で南北方向に近い。また、鉛直地圧 σ_z は2.6MPaであり、かぶり圧にほぼ等しい。また、水平方向の最大地圧はほぼ南北方向であるが、この値と水平方向の最小地圧の値はあまり違わ

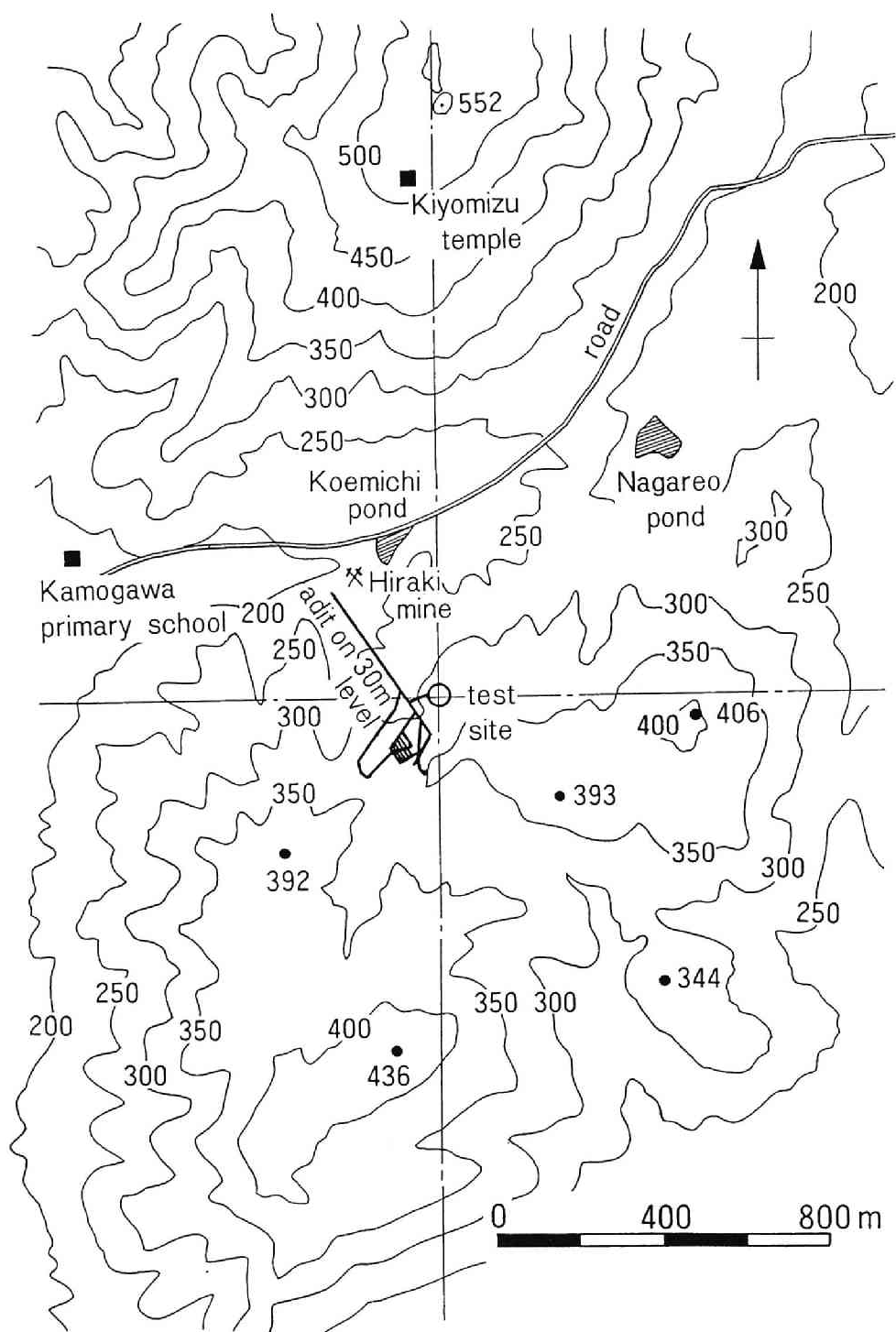


図 3-23. 平木鉾山周辺の地形図と初期地圧測定位置
 (一点鎖線は図 3-26 の地形断面図の断面)

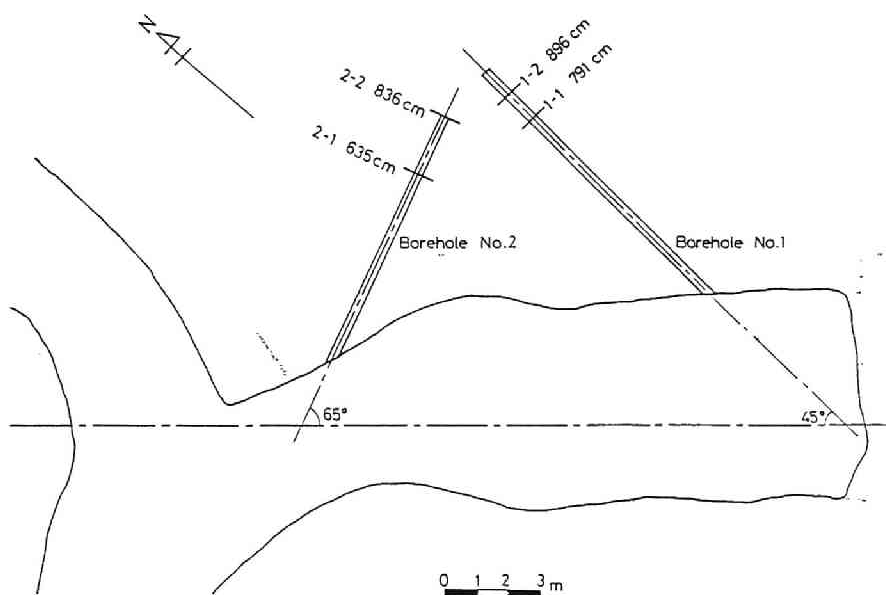
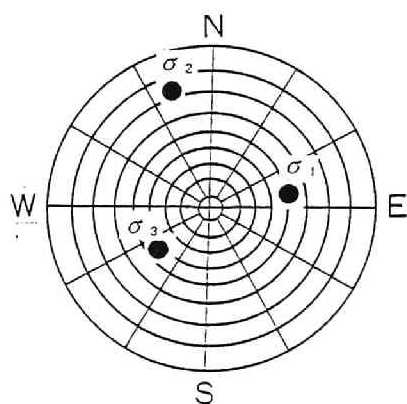


図3-24. 平木鉱山における初期地圧測定用ボアホールと測定点



$$\sigma_1 = -1.4 \text{ MPa } (263^\circ / 51^\circ)$$

$$\sigma_2 = -2.8 \text{ MPa } (160^\circ / 73^\circ)$$

$$\sigma_3 = -3.4 \text{ MPa } (52^\circ / 43^\circ)$$

$$\sigma_z = -2.6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{H\max} = -2.0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{H\min} = -2.7 \text{ MPa}$$

$$(N 2^\circ E)$$

図3-25. 平木鉱山における初期地圧測定結果

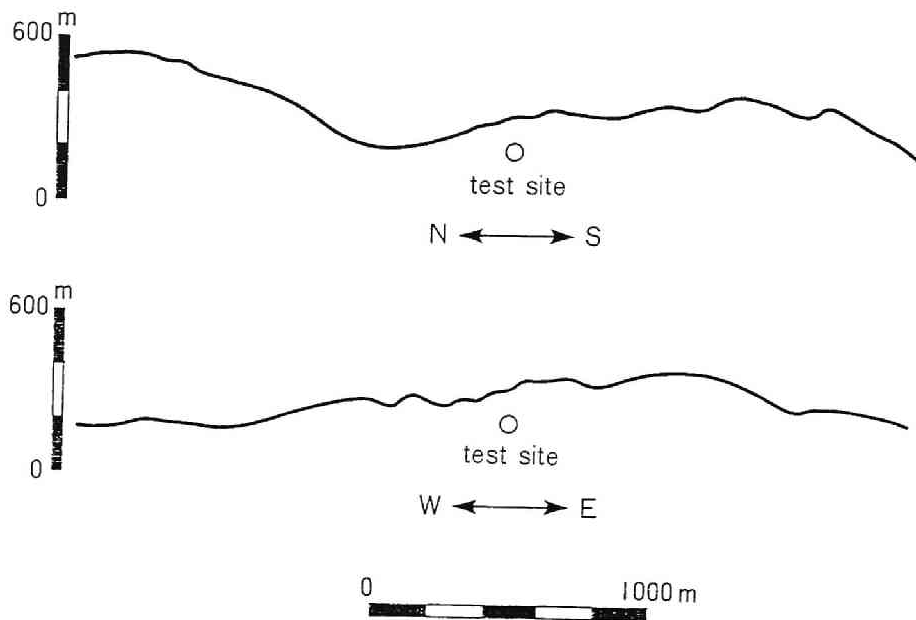


図3-26. 平木鉾山初期地圧測定位置の南北及び東西地形断面図

ないため、この測定地点付近の水平地圧が特に南北方向に卓越しているとは言えない。図3-26に測定地点を含む南北及び東西の地形断面図を示す。この図では、測定地点の北側及び東側の地形がやや高くなっているが、図3-23に示したように、測定地点の北側には海拔552mの山が東側には海拔406mの山がある。初期地圧の測定地点はかぶりが浅く、測定された解放ひずみも小さかったが、測定した初期地圧の最大地圧の方向は、この2つの山の影響を受けているものと考えられる。従って、この結果は、地表近くで地形の影響が大きく現れたひとつの例と見ることができる。

3.4. 結言

本章では、筆者が日本各地で行ってきた初期地圧測定のうち特徴的な傾向を示す5箇所の結果を選び、大きな水平地圧の存在が認められる例と地形との関連が認められる例の2種類に分類して測定箇所毎に測定結果を詳しく検討した。

大きな水平地圧の存在が認められる例として、佐々連鉱山とA地下発電所の測定結果を検討した。これらの地点では、鉛直地圧よりも大きな水平地圧が作用しており、このような大きな水平地圧の存在は、地形等の影響だけでは十分説明できない。これらの大きな水平地圧の方向を、地学的に推定されるその地域の造構応力の方向と比較すると、両者はよい一致を示す場合が多い。従って、初期地圧を正しく評価するためには、初期地圧状態と造構応力の関係について十分に検討を行う必要がある。

初期地圧測定結果と地形との関連が認められる例として、関越トンネル、明延鉱山および平木鉱山の測定結果を検討した。この検討の結果、地形が初期地圧状態に影響を与えていることは確かであるが、その影響がどの程度であるかは明らかでなく、地形の影響のより定量的な評価が必要と思われた。

このように初期地圧状態は、造構応力や地形など種々の要因の影響を受けていると考えられる。そこで次章以降では、本章で述べた5箇所9地点を含む数多くの地点での初期地圧測定結果に基づいて我が国における初期地圧状態の一般的な傾向を明らかにするとともに、造構応力、地形、岩盤の不均質性や粘性の性質などが初期地圧状態にどのような影響を及ぼすかを詳細に検討する。

参考文献

- 1) 岡野健之助, 木村昌三, 中村正夫, 許斐直: 四国地方における起震応力, 地震学会昭和54年度春季大会講演予稿集, p. 14 (1979)
- 2) 中根勝見: 日本における定常的な水平地殻歪(Ⅰ), 測地学会誌, 19巻, pp. 190-199 (1973)
- 3) 中根勝見: 日本における定常的な水平地殻歪(Ⅱ), 測地学会誌, 19巻, pp. 200-208 (1973)
- 4) 原田健久, 志村迪吉: 一等三角測量による西日本の地殻の水平移動, 地震予知連絡会報, 19巻, pp. 155-161 (1978)
- 5) 石田毅, 金川忠, 日比野敏: 地下発電所地山応力測定とその考察, 電力中央研究所研究報告No. 382025 (1982)
- 6) 御牧陽一: 新高瀬川地下発電所地点における初期地圧の測定結果について, 第8回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集(土木学会岩盤力学委員会), pp. 67-71 (1973)
- 7) 平松良雄, 岡行俊, 伊藤英文, 田中豊: 岩盤内の地山応力と地学的に推定される地殻応力の関連について, 材料, 23巻, 248号, pp. 380-386 (1974)
- 8) 藤田和夫, 岸本兆万: 近畿のネオテクトニクスと地震活動, 科学, 42巻, 8号, pp. 422-430 (1972)
- 9) 小島義一, 浅田一郎: 明延鉱床——地質構造と鉱床はい胎割目について——, 鉱山地質, 23巻, pp. 137-151 (1973)

第4章 実測結果に基づく初期地圧状態の一般的傾向¹⁾

4.1. 緒言

初期地圧状態を正しく評価するうえで、我が国における初期地圧状態の一般的傾向を明らかにすることは重要であるが、そのためには信頼できる数多くの測定データに基づいて議論を行うことが必要である。この意味で8素子ゲージを用いた孔底ひずみ法による初期地圧測定は、日本各地の鉱山、地下発電所、トンネルなどで実施されてきており、我が国の初期地圧状態の一般的傾向を明らかにするための貴重なデータと考えられる。そこで、前章で述べた5箇所9地点の初期地圧測定結果に、小坂鉱山²⁾、柵原鉱山²⁾、奥矢作地下発電所²⁾、奥吉野地下発電所²⁾、青函トンネル²⁾、中竜鉱山³⁾、神岡鉱山⁴⁾、大谷鉱山⁵⁾、新高瀬川地下発電所⁶⁾⁷⁾における初期地圧測定結果を加え、これらを表4-1のようにとりまとめた。そこで本章では、この表に示す14箇所18地点の初期地圧測定結果を基礎データとして用いる。また、我が国各地の23地点において行われた、電力中央研究所で開発した埋設ゲージによる測定結果もすでに金川らにより報告されているので、これらも参考データとして加え、我が国の初期地圧状態の一般的傾向について考察することにする。

さて、これらの測定データから初期地圧状態の一般的傾向を明らかにするためには、まず測定結果の適切な整理を必要とする。初期地圧状態を示す指標としては、主応力の方向と大きさ、鉛直地圧、平均水平地圧の大きさ、最大および最小水平地圧の方向と大きさなどがあげられる。またこれらは、測定地点の地表からの深さと密接な関係を有している。そこで、初期地圧の主応力方向の鉛直軸からの傾き、鉛直地圧・平均水平地圧・最大及び最小水平地圧と測定深度との関係について、上述の実測結果を整理し直すとともに、諸外国におけるこれらの傾向と比較することにする。なお、本章の図では、表4-1に示した8素子ゲージを用いた孔底ひずみ法による測定結果を○で、また文献8)で報告された電力中央研究所の埋設ゲージによる測定結果を●で示す。

表 4-1. 初期地圧測定結果一覧表

No.	SITE	DEPTH (m)	σ_1 (MPa) [†] (degree) [#]	σ_2 (MPa) [†] (degree) [#]	σ_3 (MPa) [†] (degree) [#]	σ_z (MPa) [†]	σ_{Hmax} (MPa) [†]	σ_{Hmin} (MPa) [†] (degree)	DIRECTION
1	KOSAKA MINE	312	-8.9 (204/43)	-12.1 (21/47)	-34.9 (112/89)	-10.4	-10.6	-34.9 (N76W)	
2	YANAHARA MINE	370	-0.9 (191/64)	-16.9 (27/24)	-32.4 (285/82)	-14.4	-3.3	-31.9 (N83W)	
3	OKUYAHAGI P/S	280	-3.1 (98/63)	-6.3 (189/88)	-9.4 (283/27)	-8.1	-4.4	-6.3 (N12E)	
4	OKUYOSINO P/S	175	-3.7 (72/61)	-4.9 (169/78)	-8.3 (280/32)	-7.1	-4.5	-5.4 (N56W)	
5	A P/S	335	-3.1 (193/73)	-11.3 (24/17)	-15.9 (284/86)	-10.6	-3.8	-15.9 (N76W)	
6	SEIKAN TUNNEL	265	-8.6 (217/19)	-9.2 (70/74)	-14.4 (337/80)	-8.9	-9.1	-14.2 (N32W)	
7	KANETSU TUNNEL ①	260	-5.9 (207/58)	-6.3 (32/32)	-14.6 (299/88)	-6.2	-6.0	-14.6 (N61W)	
8	KANETSU TUNNEL ②	960	-7.5 (3/79)	-10.7 (262/46)	-22.9 (104/47)	-16.4	-7.7	-17.1 (N79W)	
9	KANETSU TUNNEL ③	920	-6.0 (145/86)	-22.2 (235/82)	-31.6 (32/ 9)	-31.3	-6.1	-22.4 (N55E)	
10	HIRAKI MINE	110	-1.4 (263/51)	-2.8 (160/73)	-3.4 (52/43)	-2.6	-2.0	-2.7 (N 2E)	
11	SAZARE MINE ①	1565	-11.8 (356/72)	-25.4 (231/28)	-51.9 (93/68)	-27.9	-13.1	-48.0 (N89W)	
12	SAZARE MINE ②	1220	-6.1 (355/75)	-21.9 (255/55)	-36.4 (104/38)	-29.9	-7.4	-27.0 (N90W)	
13	AKENOBE MINE ①	430	-8.8 (50/75)	-11.1 (141/84)	-16.4 (254/16)	-15.9	-9.3	-11.2 (N45W)	
14	AKENOBE MINE ②	210	-7.6 (339/64)	-10.7 (172/27)	-14.5 (71/85)	-10.1	-8.1	-14.5 (N70E)	
15	NAKATATSU MINE	590	-2.0 (346/19)	-13.0 (136/73)	-21.1 (229/81)	-3.3	-12.2	-20.7 (N52E)	
16	KAMIOKA MINE	495	-5.2 (153/67)	-6.2 (262/53)	-16.0 (38/46)	-10.7	-5.5	-11.2 (N42E)	
17	OHTANI MINE	330	-2.9 (104/15)	-9.8 (305/76)	-17.8 (213/85)	-3.5	-9.4	-17.6 (N32E)	
18	SHINTAKASEGAWA P/S	250	-0.5 (355/65)	-4.7 (135/30)	-13.7 (255/70)	-5.2	-1.3	-12.4 (N84E)	

σ_1 , σ_2 , σ_3 ---- principal stress.

σ_z ---- vertical normal stress component.

σ_{Hmax} , σ_{Hmin} ---- maximum and minimum horizontal normal stress.

+ Negative sign indicates compression.

Stereographic representation (South=0) of principal stress plane. (Trend/Plunge)

4. 2. 主応力方向の鉛直軸からの傾き

初期地圧がその上方にある岩盤の自重のみに依存し、かつ地形の影響がない場合には、主応力方向のひとつが鉛直軸と一致しているはずである。このことから、水圧破碎法による初期地圧測定では、主応力の方向のひとつが鉛直であると仮定して初期地圧状態が求められている。図4-1は、我が国における初期地圧の測定データについて、鉛直軸に最も近い主応力方向が鉛直軸からどの程度傾いているかを測定点の深さに対して示したものである。この図から見れば、主応力方向が鉛直軸に一致することはむしろまれで、 $15^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 程度の広い範囲にばらついていることがわかる。このような傾向は、南アフリカでの測定結果⁹⁾や、カナダ、オーストリア、アメリカ合衆国での測定結果¹⁰⁾においても指摘されている。深くなると傾きがやや小さくなる傾向はあるが、現在までに得られているデータの範囲内ではそれは明確ではない。浅所ではこの傾く原

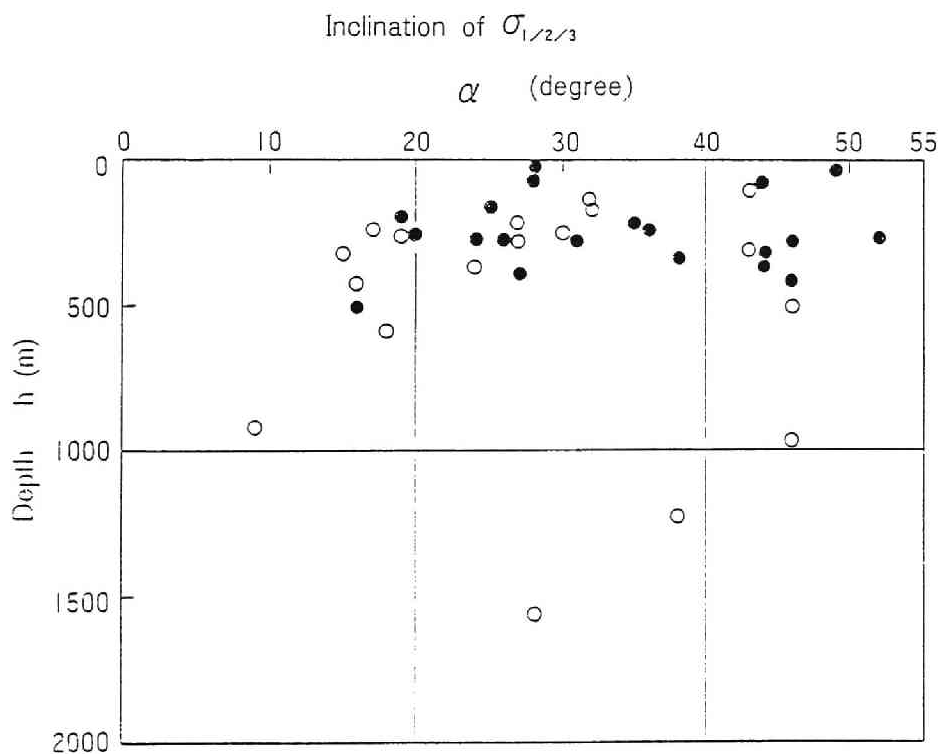


図4-1. 主応力方向の鉛直軸からの傾きと深さの関係

因として地形の影響が大きいものと思われる。また深部では、造構応力が必ずしも水平方向でない斜め方向から作用している可能性がある。いずれにしろ、一般に主応力方向の一つが鉛直軸に一致しないというのは注目に値する。

4. 3. 鉛直地圧と測定深度の関係

図4-2は、初期地圧の鉛直地圧（鉛直方向直応力成分） σ_z と測定位置の地表からの深さ h との関係を示したものである。地表（ $h=0$ ）では σ_z は0であるから、 σ_z と h の関係を原点を通る直線で近似するために、8素子ゲージによる測定と埋設ゲージによる測定の両方のデータに対して最小二乗法を用いれば、

$$\sigma_z = -0.023 h \quad \text{-----} \quad (4-1)$$

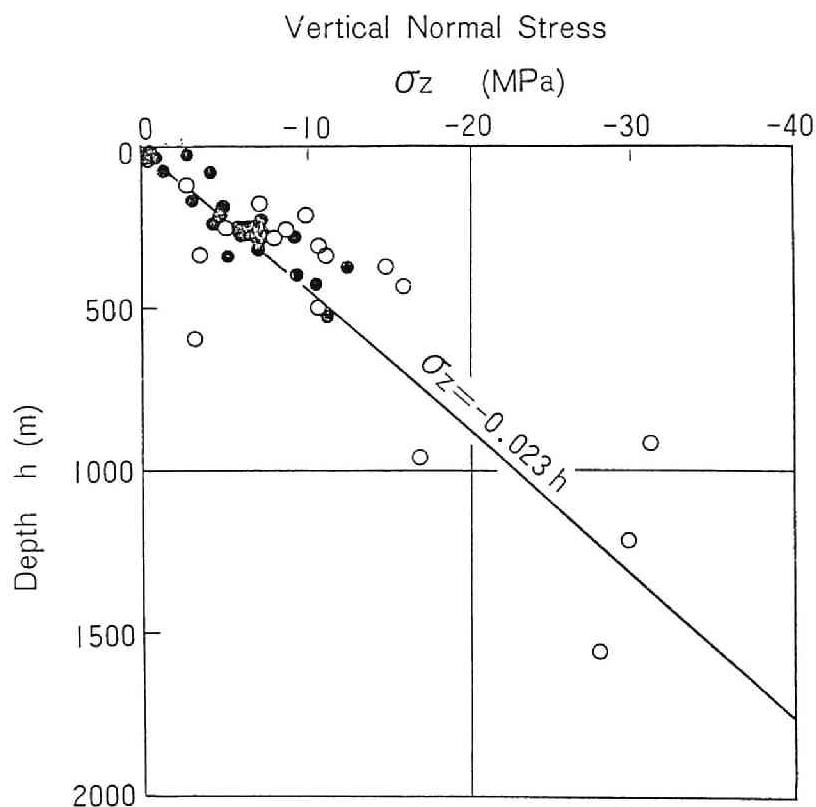


図4-2. 鉛直方向直応力成分と深さの関係

の関係が得られる。図4-2に示すように、多少のばらつきはあるものの、測定結果はほぼこの直線上にのっている。

一方、McGarr⁹⁾と Brown¹⁰⁾らは、世界各地の測定結果を同様に整理し、ともに -0.027 MPa/m の傾きの直線で表されることを報告しており、本研究の結果はこの傾きより少し小さい。また、傾き -0.023 MPa/m 、あるいは、 -0.027 MPa/m は、 σ_z がかぶりの重量のみによって生じるとした場合、密度を 2.3 t/m^3 あるいは 2.7 t/m^3 と見積もればよいことになり、実際の岩盤の密度とほぼ一致することから、 σ_z はその大部分がかぶりの重量によって生じるものと考えてよい。

4.4. 平均水平地圧と測定深度の関係

図4-3は、初期地圧における平均水平地圧、 $\sigma_{Hav} = (\sigma_{Hmax} + \sigma_{Hmin})$

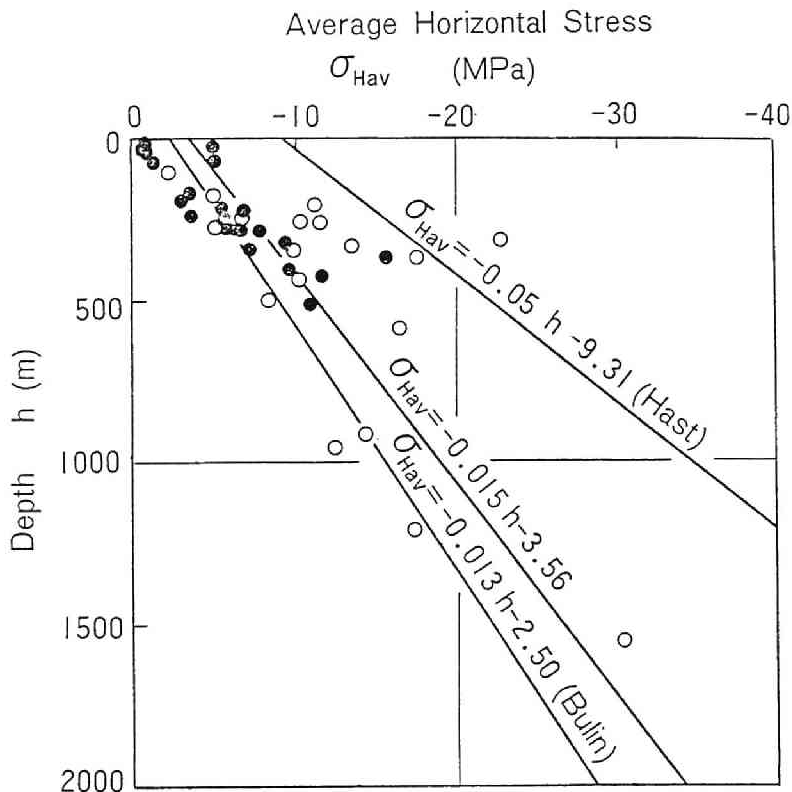


図4-3. 平均水平応力成分と深さの関係

／2と測定位置の地表からの深さ h との関係を示したものであり、測定値を直線近似すると

$$\sigma_{Hav} = -0.015h - 3.56 \quad \text{-----} \quad (4-2)$$

の関係が得られる。図中には比較のため上式の直線とともに他の2本の直線を示したが、これらはHast¹¹⁾とBulin¹²⁾が行った測定結果からRanalli¹³⁾が求めた関係である。Hast¹¹⁾の結果は、スカンジナビアの古い楕状地におけるものであり、大きな水平地圧が見られる例である。一方、Bulin¹²⁾の結果は中央アジアの卓状地の被覆堆積岩におけるもので、水平地圧が比較的小さい地域の例と考えられる。図4-3に○と●で示した日本の測定値はこの2つの直線の間にほぼ入っているが、その傾向からは被覆堆積岩のそれに近いことがうかがえる。日本は、ユーラシアプレートの東縁に位置し、太平洋プレートとフィリピン海プレートが沈み込む比較的新しい激しい変動帯に属し、大きな水平地圧が予想

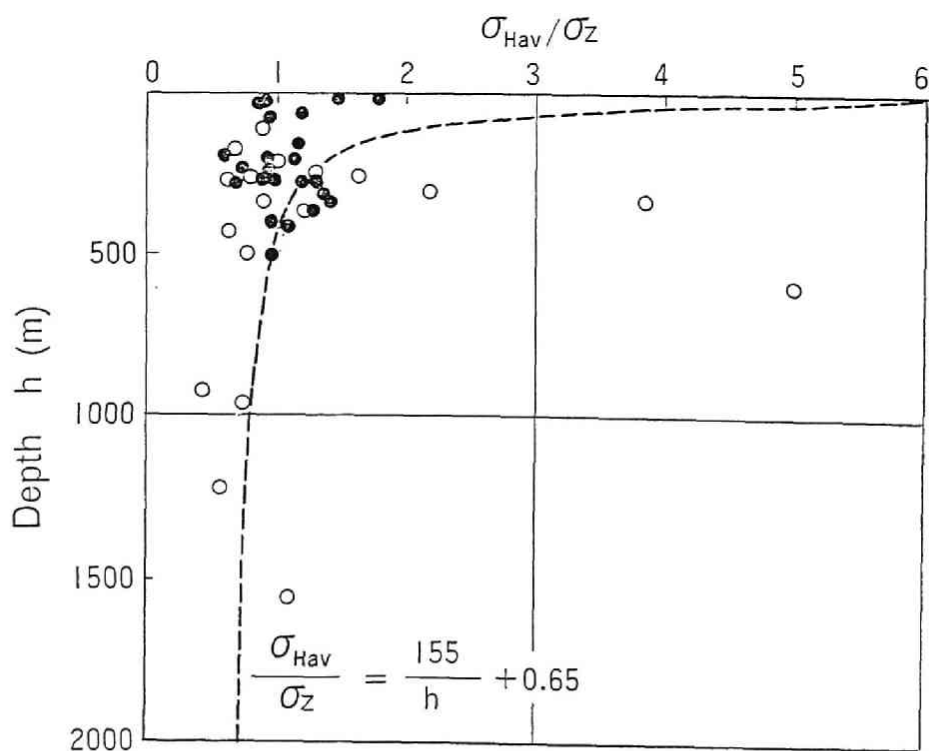


図4-4. 平均水平応力成分と鉛直応力成分との比と深さの関係

されるにもかかわらず、傾向としては平均水平地圧が小さい部類に属する結果が得られているのは注目される。

図4-4は、 σ_{Hav}/σ_z の比と測定深度 h との関係を示したものである。

(4-1)、(4-2)式より σ_{Hav} と h の関係を求めると、

$$\sigma_{Hav}/\sigma_z = 1.55/h + 0.65 \quad \text{-----} \quad (4-3)$$

となり、この関係を図中に破線で示した。同図より、(4-3)式はばらつきはあるものの測定データの傾向を示す曲線であることがわかる。 σ_{Hav}/σ_z の比は、深さ500m以内では、1前後あるいはそれ以上のものが多くなっている。しかし、深くなるにつれてその比は1以下になる傾向が見られる。これは σ_z の深さに対する増加率が σ_{Hav} より大きいことや、 σ_{Hav} は浅所でも大きな値を示す箇所が多いことによるものと考えられる。

4.5 最大・最小水平地 圧及び最大せん断応 力と測定深度の関係

図4-5および図4-6は、最小および最大水平地圧(引張応力を正としているため、それぞれ最大直応力 σ_{Hmax} 、最小直応力 σ_{Hmin} に対応する)と測定深度 h との関係を示したものである。それぞれのデータに最小二乗法を用いると、図中に示したように、

$$\begin{aligned} \sigma_{Hmax} &= -0.006h \\ &\quad -3.25 \\ &\quad \text{-----} \quad (4-4) \end{aligned}$$

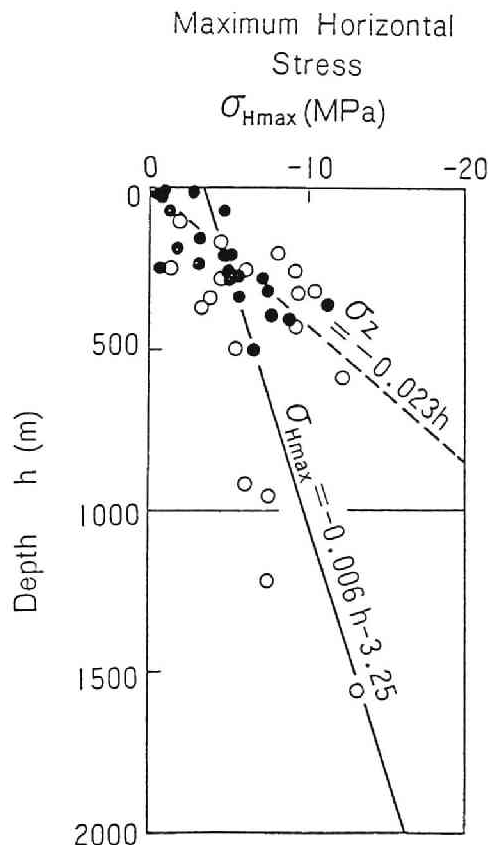


図4-5. 水平方向の最大直応力と深さの関係

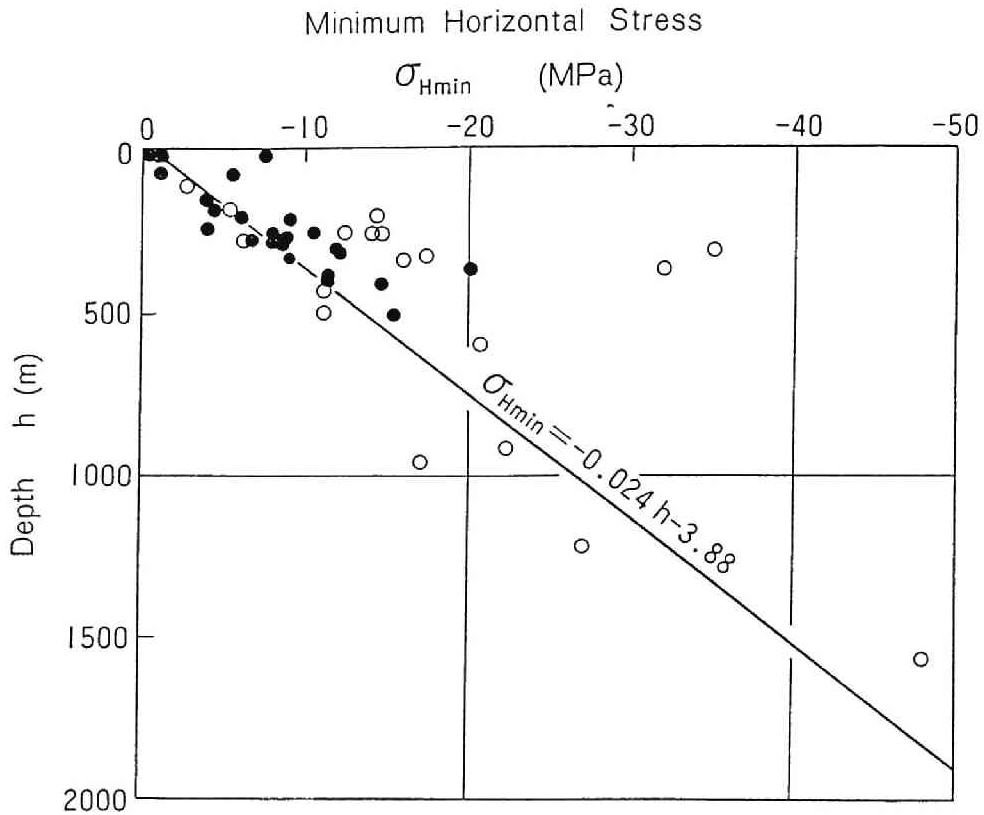


図4-6. 水平方向の最小直応力と深さの関係

$$\sigma_{Hmin} = -0.024h - 3.88 \quad \text{-----} \quad (4-5)$$

の関係が得られる。上式より、 σ_{Hmax} と σ_{Hmin} とでは傾きが大きく異なることがわかる。

さて、 σ_{Hmax} の値は、500mより深いところではすべて $\sigma_z = -0.023h$ の直線の左側に位置し、 $\sigma_{Hmax} - h$ の直線の傾きの絶対値0.006は、Bulin¹²⁾の示した被覆堆積岩における $\sigma_{Hav} - h$ の関係を示す直線の傾きの絶対値0.013よりもさらに小さい値となっている。また、McGarr⁹⁾らによって整理された南アフリカ、アメリカ合衆国の測定結果にも、本研究で得られた $\sigma_{Hmax} - h$ と同様の傾向が見られる。従って、 σ_{Hmax} は自重のみが作用する弾性岩盤が水平方向に拘束された場合に生じる圧力に対応する場合が多いのではないかと推察される。一方 σ_{Hmin} の方は、そのばらつきも大きく σ_z とほぼ同

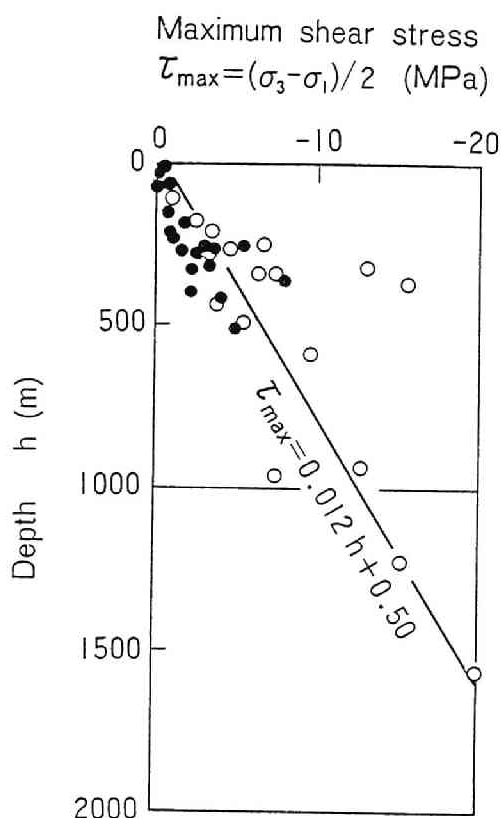


図4-7. 最大せん断応力と深さの関係

程度の増加傾向を示し、その発生には $\sigma_{H\max}$ とは明らかに異なった要因が考えられる。この要因については次章で考察する。

図4-7は、最大せん断応力 τ_{\max} と測定深度 h の関係を示したものである。ばらつきは大きい、 τ_{\max} は深さとともに増大する傾向があり、このデータで見ると、その最大値は20MPaである。

McGarr⁹⁾らが整理した世界各地の測定結果においても、 τ_{\max} と h の関係には同様の傾向があり、また、 τ_{\max} が20MPaを越える例は多く

ない。 τ_{\max} の上限値は地殻の強度や地震の発生機構と関連しており興味深い。それを明らかにするためにはより深部の地下における測定データが必要である。

4.6 結言

本章では8素子ゲージを用いた孔底ひずみ法による18地点の測定結果と、電力中央研究所で開発した埋設ゲージによる23地点の測定結果、合計41地点の測定結果をもとに、とくに測定された初期地圧状態と測定深度との関係について考察を行った。種々の初期地圧測定法のうちで、応力解放法に基づく方法が最も測定精度が高いと言われているが、上述の2種類の測定法はいずれもこの測定原理に基づいている。また、本章で整理した測定結果はすべて我が国

の北海道から九州までの範囲で得られたものである。従って、これらの結果は、我が国の初期地圧状態を代表しているものと思われる。

これらの結果から、我が国における初期地圧状態の一般的傾向について、つぎのことが言える。

(1) 主応力方向のうち最も鉛直軸に近いものでも 15° 以上傾くのが普通で、鉛直軸に一致することはまれである。

(2) 鉛直地圧 σ_z は多少のばらつきはあるものの、その地点の地表からの深さ h に対応するかぶり圧 ($\rho g h$) にほぼ等しい。

(3) 地表からの深さの増大に伴う平均水平地圧 σ_{Hav} の増加の割合は、本研究に用いた測定データに基づけば、世界各地での測定結果の中で小さい部類に属する。

(4) σ_{Hav}/σ_z の比は、深さ 500 m 以内では 1 前後あるいはそれ以上のものが多いが、深くなるにつれて 1 以下となる。

(5) 最大せん断応力 τ_{max} は、地表からの深さとともに増大する。

(6) 水平方向の最小・最大地圧は、どちらも地表からの深さとともに増大するが、その傾向には地域によってかなり相違が見られ、これらの応力の発生には異なる要因が考えられる。

(7) 水平方向の最小地圧は、自重のみが作用する弾性岩盤が水平方向に拘束された場合に生じる圧力に対応する場合が多いと考えられる。

参考文献

- 1) 斎藤敏明, 石田毅, 寺田孚, 田中豊: 実測結果に基づくわが国の地下岩盤内の初期地圧状態の検討, 土木学会論文集, 394号/Ⅲ-9, pp. 71-78 (1988)
- 2) 亀岡美友: ボーリング底面上の応力の解放による岩盤応力測定に関する研究, 京都大学学位申請論文 (1978)

- 3) 中島健, 田中豊, 玉井昭雄, 斎藤敏明: 応力解放法による地殻応力の測定(4)――福井県中竜鉾山における測定――, 地震学会昭和56年度春季大会講演予稿集, p. 122 (1981)
- 4) 小笠原宏, 中島健, 田中豊, 玉井昭雄, 斎藤敏明: 応力解放法による地殻応力の測定(5)――岐阜県神岡鉾山における測定――, 地震学会昭和56年度秋季大会講演予稿集, p. 23 (1981)
- 5) 小笠原宏, 中島健, 田中豊, 玉井昭雄, 斎藤敏明: 応力解放法による地殻応力の測定(6)――京都府大谷鉾山における測定――, 地震学会昭和57年度春季大会講演予稿集, p. 113 (1982)
- 6) 御牧陽一: 新高瀬川地下発電所地点における初期地圧の測定結果について, 第8回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集(土木学会岩盤力学委員会), pp. 67-71 (1973)
- 7) 平松良雄, 岡行俊, 伊藤英文, 田中豊: 岩盤内の地山応力と地学的に推定される地殻応力の関連について, 材料, 23巻, 248号, pp. 380-386 (1974)
- 8) Kanagawa, T., Hibino, S., Ishida, T., Hayashi, M. and Kitahara, Y.: In situ stress measurements in the Japanese Islands: Over-coring results from a multi-element gauge used at 23 sites, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.23, pp.29-39 (1986)
- 9) McGarr, A. and Gay, N.C.: State of stress in the earth's crust, Ann. Rev. Earth Planet. Sci., pp.405-436 (1978)
- 10) Brown, E.T. and Hoek, E.: Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.15, pp.211-215 (1978)
- 11) Hast, N.: The state of stress in the upper part of the earth's crust, Tectonophysics, Vol.8, pp.169-211 (1969)
- 12) Bulin, N.K.: The present stress field in the upper parts of the crust, Geotectonics, Vol.3, pp.133-139 (1971)
- 13) Ranalli, G.: Geotectonic relevance of rock-stress determinations, Tectonophysics, Vol.29, pp.49-58 (1975)

第5章 初期地圧状態に影響を及ぼす 諸要因に関する検討

5.1 緒言

初期地圧状態は地下空洞の安定に大きな影響を与えるため、地下空洞の掘削にあたってはその予定地点で初期地圧を実測することが望ましい。しかし、初期地圧の実測には多大の労力と費用を要するため、簡単に行うことができないのが実状である。もし、実測することなくその地点の初期地圧状態をある程度予測することができれば、重要構造物の建設に関するフーズビリティ・スタディーや、事前調査に多大の費用を支出できないような小規模な地下構造物の設計、施工及び維持に有用な情報を提供することができよう。

さて前章では、我が国の初期地圧状態の一般的傾向をある程度明らかにしたが、その結果をみると、鉛直地圧の大きさは地表までのかぶり厚さに相当する圧力を見積もればほぼよいように思われる。しかし水平方向の地圧状態は測定地点により傾向が異なり、また最大水平地圧と最小水平地圧の大きさは大きく異なる場合が少なくない。このことは、地下空洞の安定問題などを考察する場合、最大水平地圧の作用方向の推定が重要であることを示している。そこで本章では、初期地圧評価のための要因の選定を目的として、水平地圧の発生機構を明らかにすることに重点を置き、造構応力、地形、岩盤の不均質性、岩盤の粘弾性的性質、残留応力など、初期地圧に影響を及ぼす諸要因について検討を加える。そして最後に、これらの結果に基づいて、初期地圧状態の予測法の提案を試みる。

5.2 造構応力¹⁾

水平方向の最大地圧 $\sigma_{H_{\max}}$ （引張応力を正としているので最小直応力 $\sigma_{H_{\min}}$ に対応する）の発生に最も深く関連していると思われる要因のひとつは、造構応力あるいは地殻応力と呼ばれる、地殻構造形成に関する力に対応する応力である。地下構造物の安定に造構応力が影響を与えることは、工学の分野よりもむしろ地球物理学などの分野で早くから予想され、英国ではすでに1940年

頃に、地殻応力の作用方向を鉱山の坑道の被害状況から知ろうとする試みのため、いくつかの鉱山に調査票が配布されている²⁾。一方、我が国で初期地圧と造構応力との関連を実証的に指摘したのは、平松らが最初³⁾と思われる。彼らは、長野県大町市の東京電力新高瀬川地下発電所および兵庫県朝来町の関西電力奥多々良木地下発電所の建設に際して応力解放法により測定された初期地圧測定結果を、地学的方法によって推定されたそれら地域の造構応力とそれぞれ比較し、どちらの地点でも初期地圧測定結果と造構応力の最大圧縮方向がほぼ一致することを示している。しかし、地下構造物が建設されるのはせいぜい地表下数100mの深さの浅所が多く、このような地殻の極めて浅所で、造構応力の影響が大きいかどうかについてはなお議論の余地がある。Haimson⁴⁾は、アメリカ合衆国ウィスコンシン州の緩傾斜地の地下珪岩中で、水圧破碎法による初期地圧測定を行い、初期地圧状態に及ぼす地形および造構応力の影響について興味ある結果を報告している。これによれば測定地点の最大水平地圧の方向は、20mより浅いところと30mより深いところでは90°近く異なっている。この結果についてHaimsonは、20m以浅の初期地圧状態は地形の影響を受けているが、30m以深のそれは、この地域の造構応力を反映していると述べている。また我が国では、田中ら⁵⁾が、深度700m～1000mで発生した兵庫県生野鉱山の山はね、同鉱山休止後の坑内水没による水の浸透によって誘起されたと思われる深度2～5kmの岩盤の破壊による震動、同鉱山周辺の深度5～15kmの微小地震の発生機構、およびこの地域の深度100m～400mで測定された初期地圧測定結果が、いずれも深さに関係なく一致して東西圧縮の傾向を示すことを報告している。これらのことから、筆者が測定してきた初期地圧測定結果も造構応力の影響を強く受けているといえる。

さて、我が国における造構応力はどのような状態にあるのであろうか。日本列島は、フィリピン海プレートと太平洋プレートが沈み込むユーラシアプレートの東縁に位置し、地震活動をはじめとする地殻変動が活発な地域である。藤田⁶⁾は、図5-1に示す第四紀に活動的となった構造帯の分布から、本州に作用する造構応力系について検討を加え、本州は太平洋プレートによる東西性の圧

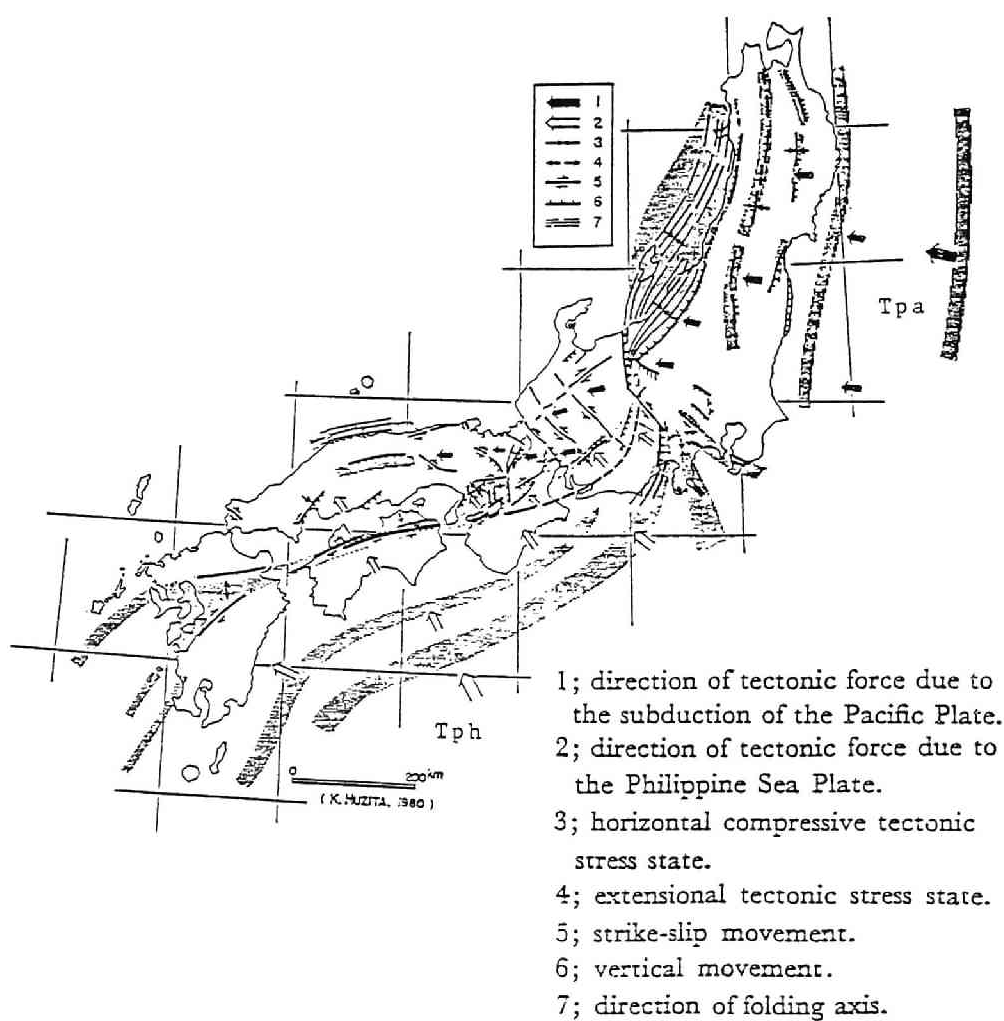


図5-1. 本州における第四紀構造帯の分布と本州に作用する造構応力系⁶⁾

縮応力 (\Rightarrow , Tpa) とフィリピン海プレートによる南北性の圧縮応力 (\Rightarrow , Tph) の 2 つの造構応力系に支配されているとしている。一方、杉村は、日本付近におけるプレートの境界について検討し、フィリピン海プレートは日本列島中央部の伊豆半島の付け根の陸上部でユーラシアプレートと衝突し、ユーラシアプレートを北西に圧縮しているとしている。

このような地殻運動を評価する一方法として、地表の変位分布を測定して推定する方法が考えられる。日本においては全国規模で一等三角点測量（測線は約 45 km）が定期的に実施されている。第 1 回測量は 1882～1909 年、第 2 回測量は 1948～1967 年および第 3 回測量は 1968～1972 年に実施された。原田らは、第 1 回および第 2 回の測量結果の差から、一等三角点からなる各三角形毎に最大・最小ひずみとその方向を算出した。その後、中根は、第 1 回から第 3 回までの測量結果を用いて、その間に発生した地震による地殻変動の影響を取り除き、定常的な水平地殻ひずみを算出した。その結果を、図 5-2 に転載する。同図の矢印の方向は最大圧縮軸方向であり、矢印の長さは最大せん断ひずみ速度を表している。また、鳥取県付近の 2 つの破線の矢印は二等三角点の測量結果から得られたものであり、一等三角点測量より得られたもの（実線）と区別して示している。この図 5-2 に示した日本列島の定常的な水平地殻ひずみの主方向は、藤田や杉村が指摘した、プレートの運動から推定される造構応力の作用方向と一致する傾向を示している。このようなプレートによる圧縮力は、初期地圧に対しても影響を与え、特に水平方向の初期地圧を増大させている。

さて、実際に筆者らが測定を実施した初期地圧状態に造構応力はどの程度影響を及ぼしていたのであろうか。これを明らかにするために、測定結果に測定地点の深さの違いを補正することが必要である。そこで測定結果の最大水平地圧 σ_{Hmin} から、図 4-6 に示した式に基づいて深さによる増分を除いた σ_{Hmin}' を次式で求める。

$$\sigma_{Hmin}' = \sigma_{Hmin} + 0.024h \quad \text{-----} (5-1)$$

図 5-3 に各測定地点の σ_{Hmin}' の大きさと方向を、孔底ひずみ法による結果

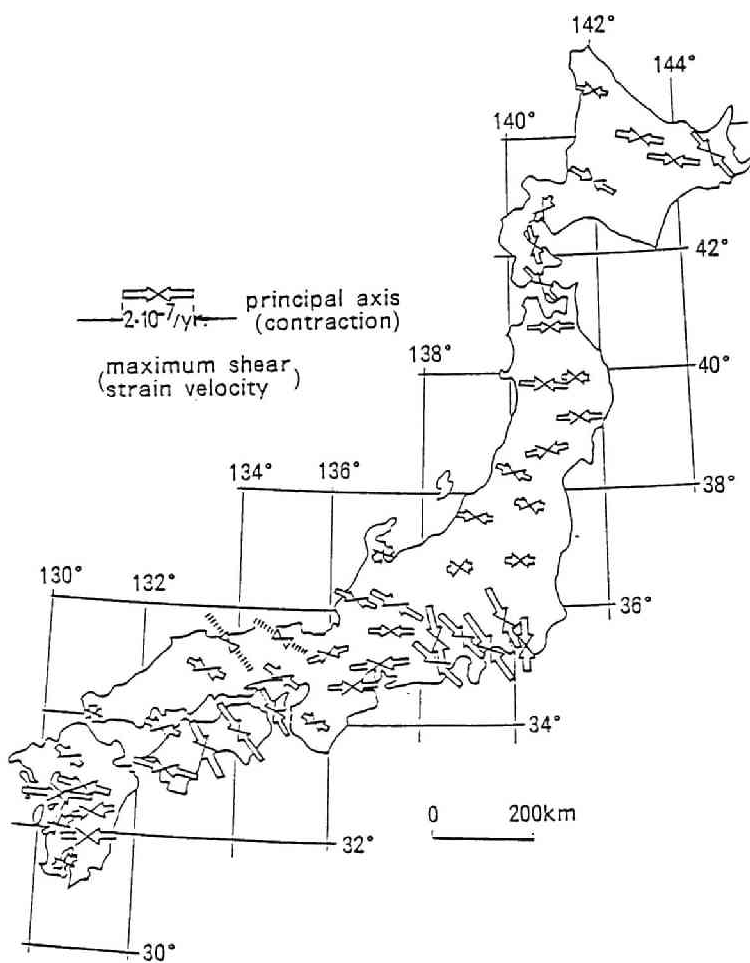


図5-2. 一等三角点の再測量から求めた、日本における定常的な水平地殻ひずみの主ひずみの主圧縮方向¹⁰⁾

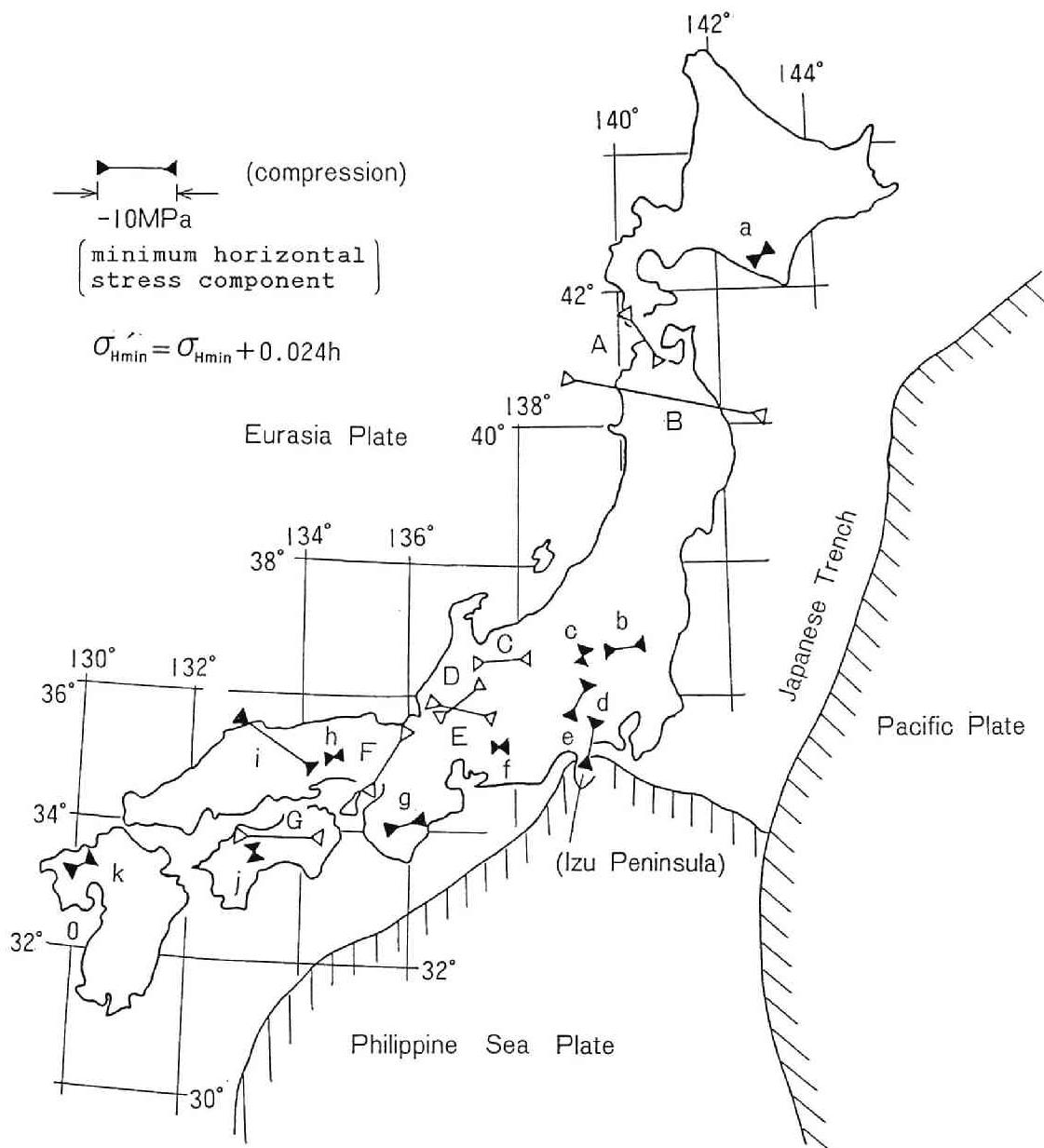




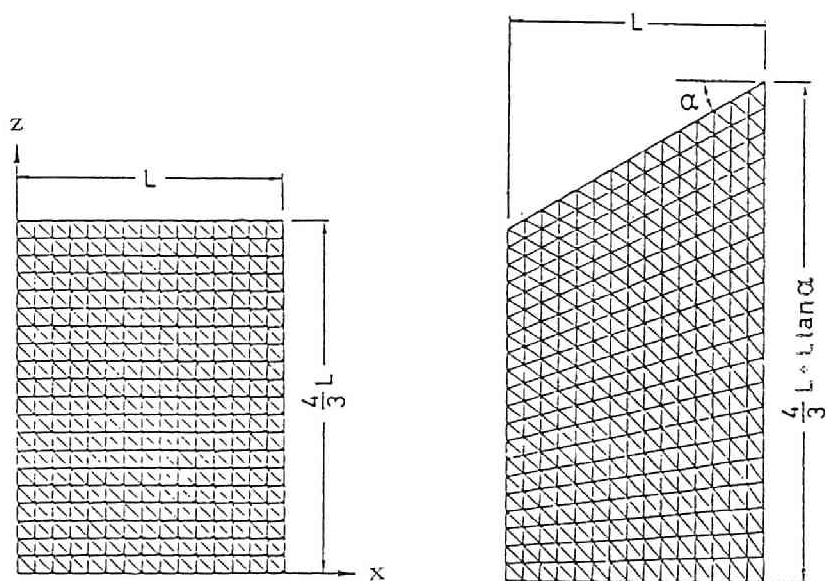
図5-3. 深さの影響を除いた水平方向の最大地圧の大きさと方向の分布
 (A, B, C, D, E, F, Gは孔底ひずみ法、a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, kは電中研方式による結果)

(A, B, … G) を  で、電力中央研究所の埋設型ゲージによる結果 (a, b, … k) を  で示した。また、同図には杉村⁷⁾による新第三紀以降のプレートの境界をも示した。測定地点 B, C, D, E 及び b, f, g, h, i, k は東西圧縮の傾向が強く、これは太平洋プレートによる圧縮力の影響を受けているものと推測される。測定点 c, d, e は、南北圧縮の傾向が強く、これは伊豆半島の付け根でユーラシアプレートに衝突しているフィリピン海プレートの圧縮力によるものと思われる。四国地方では G と j で傾向が異なるが、これらはいずれも中央構造線に近い位置での測定であり、この付近の複雑な造構応力場を反映している可能性がある。またこれらの全般的傾向は、藤田により推定された造構応力の作用方向 (図 5-1) や中根による定常的な水平地殻ひずみ (図 5-2) の傾向と概ねよい一致を示している。これらのことから、初期地圧の水平成分はプレートテクトニクスに基づく地殻構造形成に関する力に深く関連することが予想され、また、このような力は初期地圧状態の地域的な違いを特徴づける大きな要因となっているものと考えられる。

5.3. 地形

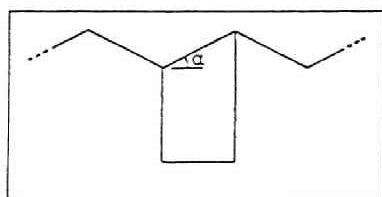
鉱山、地下発電所、トンネルなど実際の地下空洞は、地表近くに位置することが多く、従ってそれらの建設される箇所の初期地圧状態は地形の影響を大きく受けている場合が多い。地形が初期地圧状態に影響を与えることは容易に予想され、古くから光弾性実験によりその影響が検討されてきた¹¹⁾。また、最近では理論解析による地形の影響の検討が報告されているが、ここでは単純な一般的地形モデルを考え、有限要素法を用いて自重により発生する岩盤内の応力状態について考察する。¹²⁾¹³⁾

地形の基本モデルは図 5-4 (a) であり、これをもとに図 5-4 (b) のように地表斜面の角度 α を変化させ、地形の変化に伴う岩盤内の応力状態の変化を検討する。解析にあたっては、2次元平面ひずみ問題とし、自重のみを考慮した。z の負方向が重力の作用方向である。境界条件としては側方は x 方向変位を固定、底部は x 方向変位、z 方向変位とも固定とした。この境界条件か



(a) 基本モデル

(b) 傾斜角 α のモデル



(c) 実際に解析している地形

図5-4. 地形の解析モデル

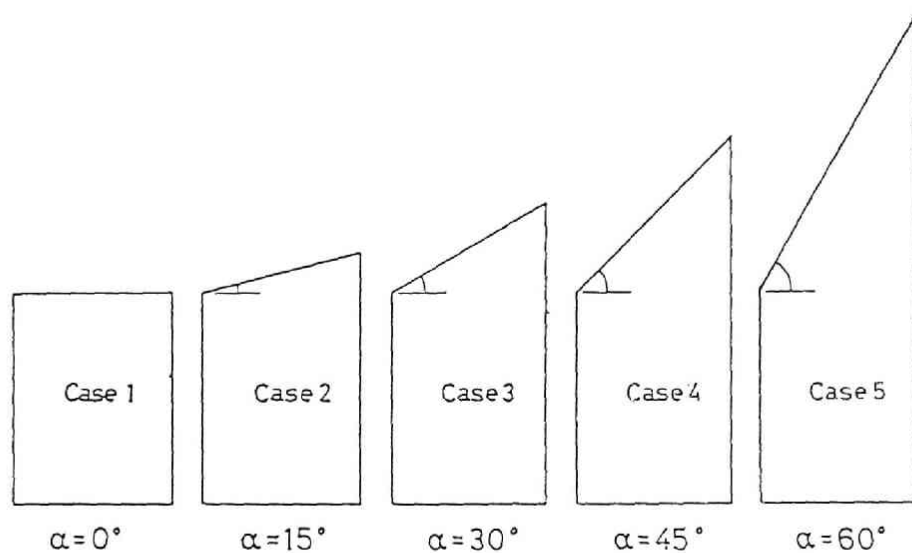


図5-5. 解析モデルの傾斜角

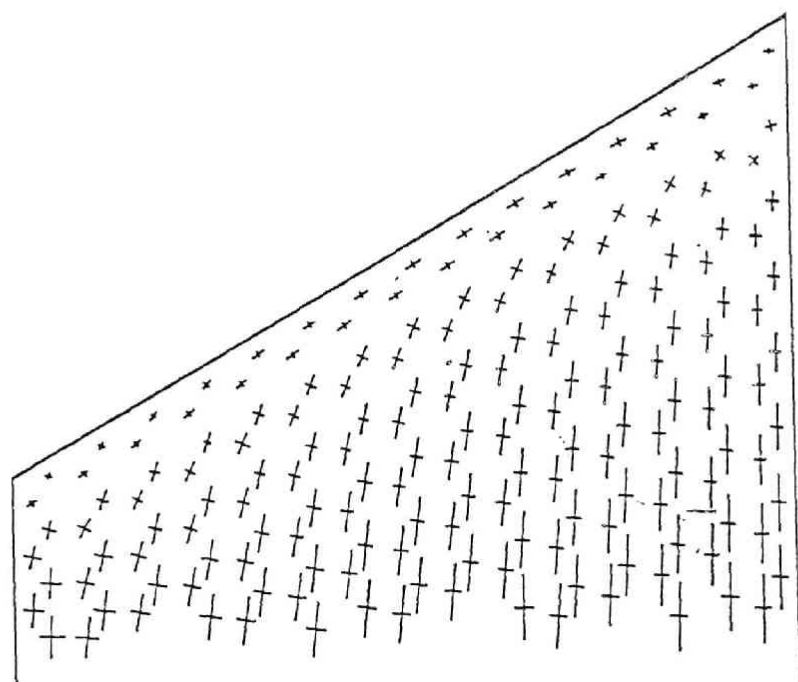


図5-6. $\alpha = 30^\circ$ の場合の主応力の大きさと方向

らx方向に対称性が生じ、実際に解析しているのは図5-4(c)の地形となる。岩盤は均質等方の完全弾性体であると仮定し、ヤング率は50GPa、ポアソン比は0.25として解析を行った。斜面の角度 α は、図5-5のように15°ずつ変化させ、0°～60°までの5つのケースについて考えた。図5-6には解析結果の一例として、 $\alpha=30^\circ$ の場合の主応力の大きさと方向を示した。地表面近くでは、主応力の方向が鉛直からかなり傾いていることが認められる。

さて、図5-7は最小主応力(最大地圧) σ_3 の鉛直軸(z軸)からの傾きを示している。主応力の大きな傾きは斜面に近い領域に限られており、深い位置ではほとんど傾いていない。また斜面のすぐ下、すなわち地表に近いところでは、 σ_3 の方向が斜面と平行になっている。解析モデルの左端、すなわち谷地形を表す部分では、 σ_3 の方向の傾く領域が広い範囲に及んでいる。

図5-8は、各要素の重心から直上の斜面までの距離、すなわち、かぶり深さを h としたときの $\sigma_z/\rho gh$ の値である。ここに、 σ_z は鉛直地圧(鉛直方向の直応力成分)、 ρ は岩盤の密度、 g は重力加速度を示す。従って σ_z をかぶり圧 ρgh で見積もった場合、 $\sigma_z/\rho gh < 1$ のところでは実際の σ_z は見積もりより小さい値となり安全な設計が得られるが、 $\sigma_z/\rho gh > 1$ のところではかぶり圧を過小評価することになり危険な状態となることを示している。つまり、右端の尾根地形を表す付近では見積もりより小さな値になるが、左端の谷地形を表す付近では見積もりよりかなり大きな値となり注意を要することがわかる。また、斜面直下の比較的地表近くでも、尾根のごく近傍を除いて見積もりより大きな値を示すことは注目される。斜面の傾斜角 α の値が大きくなると、 ρgh で見積もられる範囲が次第に小さくなり、Case 5の場合などは、 $0.9 < \sigma_z/\rho gh < 1.1$ となる範囲は非常に狭い領域に限られてしまう。このことは、急峻な山岳地帯などの地下では、 σ_z を単純に ρgh で予測できないことを示している。 h が大きくなる、すなわちかぶりが深くなるにつれて、 $0.9 < \sigma_z/\rho gh < 1.1$ の範囲は広がっていく傾向を示すが、斜面の傾斜角 α が大きくなるにつれて、その範囲は小さくなる。

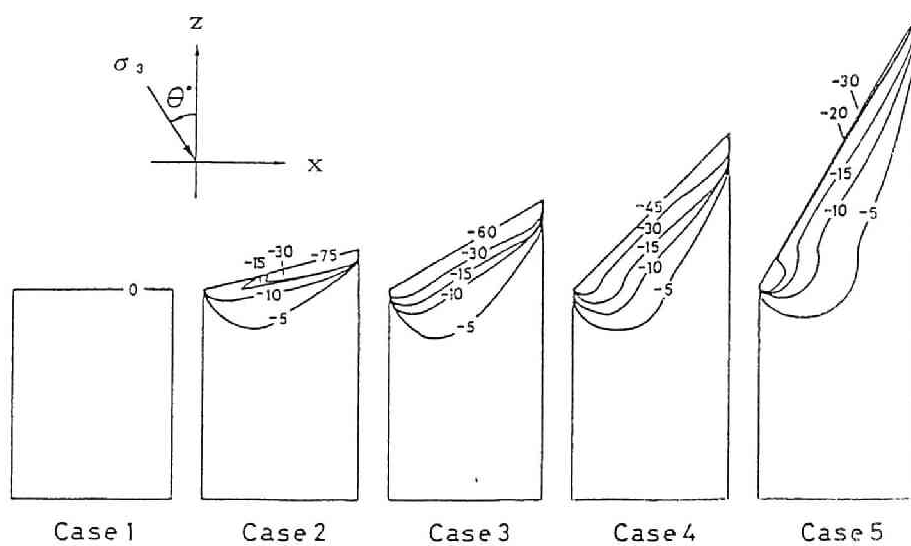


図5-7. 最大地圧 σ_3 の鉛直軸(z 軸)からの傾き

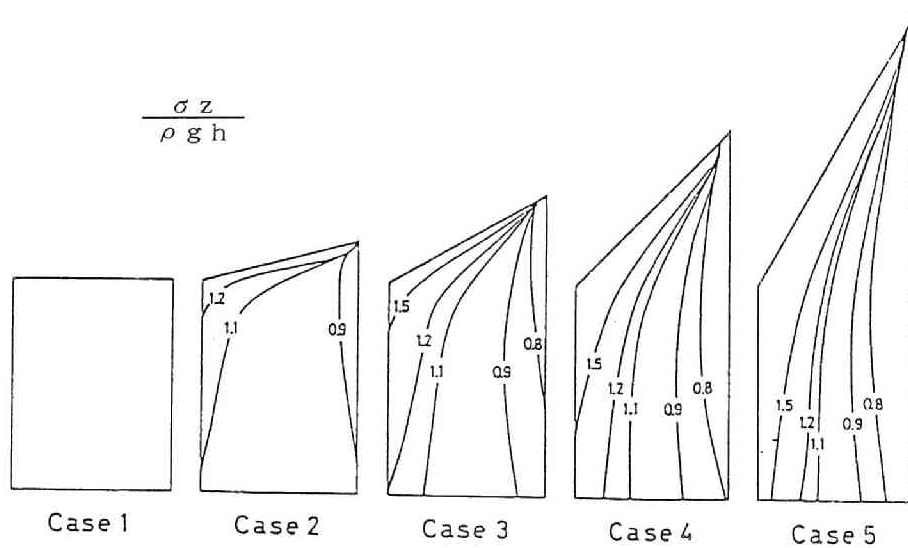


図5-8. $\sigma_3 z / \rho g h$ の値の分布

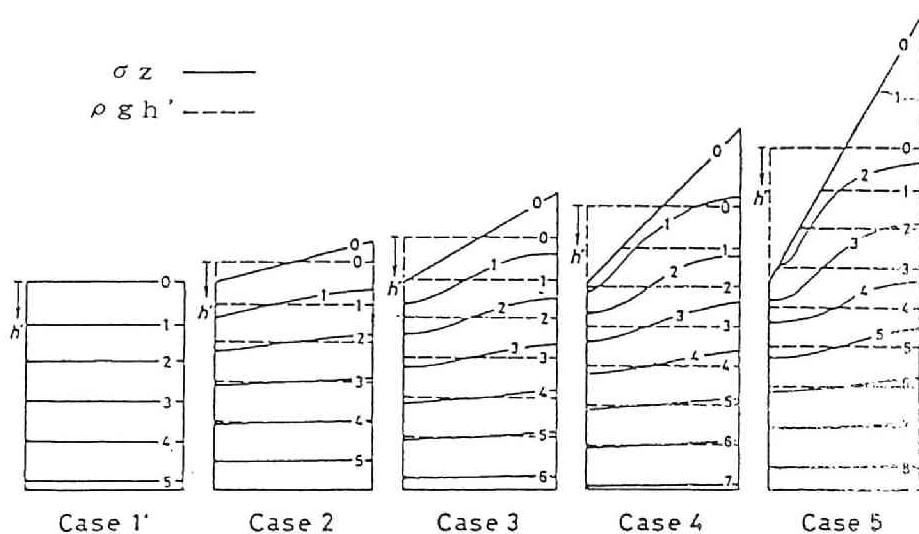


図5-9. 鉛直地圧 σ_z と地表の平均高さからの距離 h' を用いたかぶり圧の見積もり値 $\rho g h'$ の比較

図5-9は、鉛直地圧 σ_z を等応力線で示したものである。数字は、 σ_z の値を一定の応力値で除して正規化した値を示す。地表面が傾斜していても、岩盤内のある程度の深さまで達すると、等応力線がほぼ水平になることがわかる。一方、図中の破線は斜面の中点を含む水平線からの距離を h' として $\rho g h'$ を計算し、図示したものである。 σ_z と $\rho g h'$ が一致する地点では、 σ_z を $\rho g h'$ で見積もることができる。図では斜面の傾斜角の違いにより多少の差はあるが、岩盤内である程度の深さをもつ水平面まで達すると σ_z と $\rho g h'$ は一致してくる。これは、地表面が傾斜していても一定深さ以上のかぶり深さがあれば、鉛直地圧 σ_z を、地表の平均高さからの距離 h' を用いて $\rho g h'$ で見積もることができることを示している。

5. 4. 岩盤の不均質性¹⁴⁾

我が国の地質構造は諸外国に比べてかなり複雑であり、地下空洞の掘削が予定される地点の地質は多種多様な構造と岩種からなっている場合が多い。さらに同一岩種内においても、岩盤生成時の環境の違いやその後の鉱化作用や風化

作用の違い、あるいは断層や節理の分布密度やその状態の違いにより、岩盤物性が異なることが少なくない。このような不均質な岩盤に、岩盤自重や造構応力などが作用した場合、岩盤内の応力分布は一樣とならず、分布しているなかで比較的剛性の高い岩盤中に応力が集中することが予想される。しかし、このような岩盤内の応力分布の不均質性に関連した実証的な研究はあまり見受けられない。筆者は、第3章で述べたA地下発電所で、8素子ゲージを用いた孔底ひずみ法とともに電力中央研究所の埋設型ゲージによる応力解放法でも初期地圧の測定を行った。この埋設型ゲージによる結果を測定地点の岩質や地質と比較したところ、不均質な岩盤中の初期地圧の分布は一樣ではなく、軟らかい岩盤よりも堅硬な岩盤でより大きな圧縮応力が生じている傾向が見られた。

A地下発電所予定地における初期地圧測定地点のボアホールの配置、測点と岩質の状態を図5-10に示す。図中のB、C_Hなどは電力中央研究所方式の岩盤分類による岩盤等級である。電力中央研究所方式の岩盤分類は、岩盤が新鮮・硬質なものをから風化により劣化する現象をとらえ、この過程を地質学上の主要要素として等級区分する方法であり、調査横坑壁面やボーリングコアに対する肉眼観察、ハンマーの打撃などの野外調査に基づき、経験ゆたかな土木地質技術者の判断により分類する方法である。岩盤等級は新鮮・硬質なものをから順にA、B、C_H、C_M、C_L、Dと示されるが、これらの等級を岩盤の剛性などの物性値と直接対応させることはできない。しかし、少なくとも同一地点において岩盤等級が高い（Aに近い）ほど、岩盤は堅硬ち密であり、岩盤の剛性は高いと判断できる。従って、測定地点一帯は流紋岩であるが、岩盤等級から見る限り岩盤の剛性は一樣でなく、岩質は不均質である。なお、同図のボアホールN_o. 2及びN_o. 4では、8素子ゲージによる測定を行ったが、以下ではボアホールN_o. 1、3、5で行った電力中央研究所の埋設型ゲージによる測定データについて議論する。

測定に用いた電力中央研究所の埋設型ゲージを図5-11に示す。このゲージを径56mmの先進ボーリング孔にセメントペーストで埋設し、養生固結後径218mm（コア径197mm）のオーバーコアリングを行い、解放ひずみ

— point of measurement with the hollow inclusion gauge

— point of measurement with doorstopper-type 8-element gauge

E' strain sensitivity coefficient of the hollow inclusion gauge

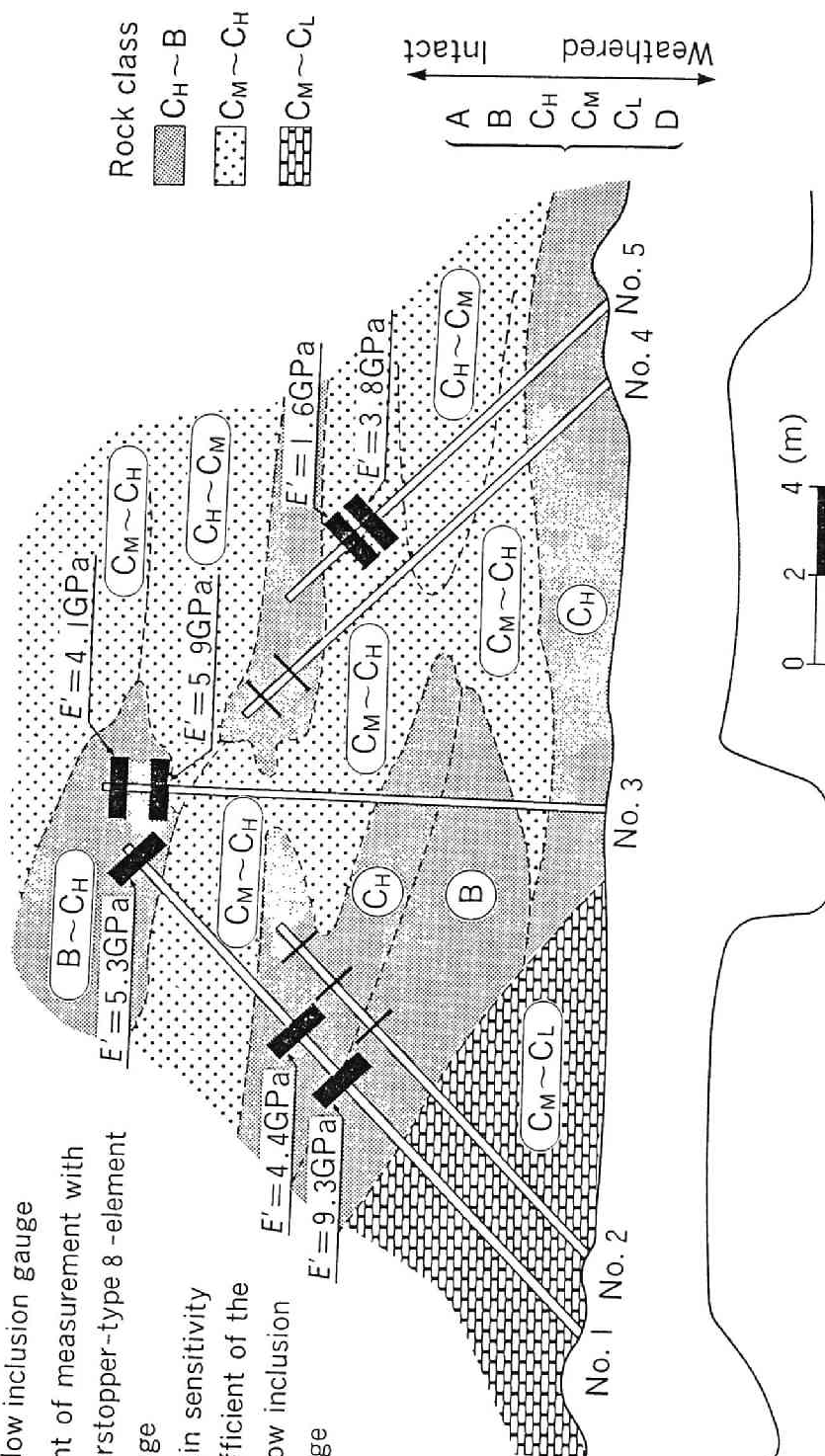


図 5-10. 初期地圧測定地点のボアホールの配置・測点と岩質の状態

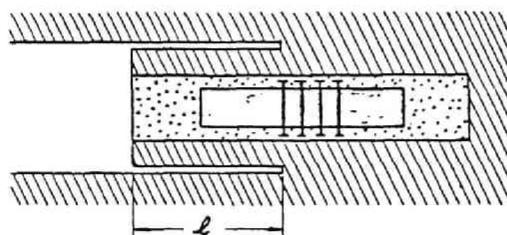
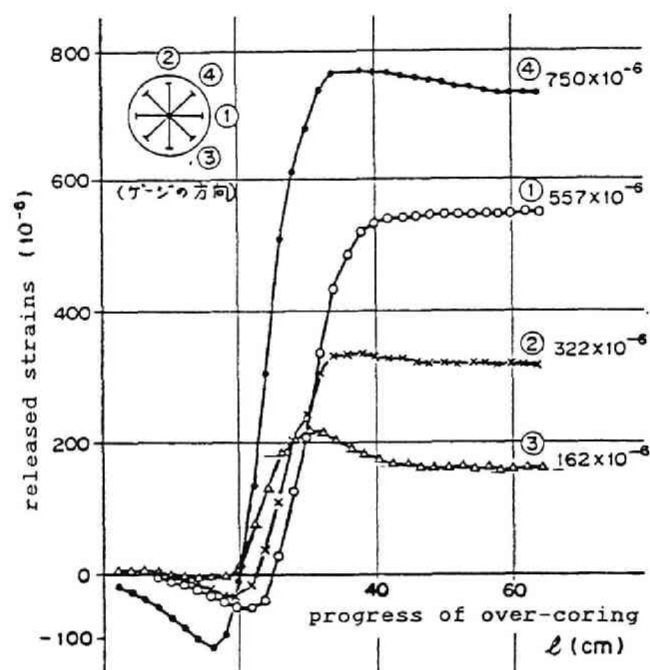
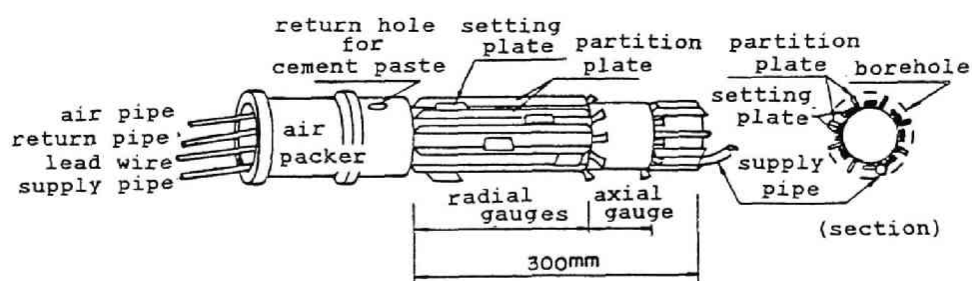


図5-11. 埋設型ゲージの見取り図と、応力解放に伴うひずみの連続変化の例 16)

を測定した。図5-11のゲージは、ボーリング軸方向1成分と、ボーリング軸と直交する平面内に互いに45°の角度をなすように配置された孔径方向4成分を内蔵した5成分ゲージである。この他、ボーリング軸を含む平面内にボーリング軸と45°をなす方向に配置した斜め方向のゲージも一部で使用した。解放ひずみから初期地圧を求めるためには、ゲージのひずみ感度係数が必要である。電力中央研究所方式の場合には、現地で解放ひずみを測定したコア（外径197mm、内径56mm、長さ約500mmの中空円筒岩石コアの中空部にセメントミルクでゲージを埋設したもの）を用いて静水圧3軸試験を行い、ゲージの各成分毎にひずみ感度係数を求める¹⁶⁾。このひずみ感度係数は、中空岩石コア内部にセメントと埋設ゲージを含んでいるため、岩盤の剛性そのものではないが、測定箇所の岩盤の剛性を反映した値である。図5-10には、各測定コア毎にひずみ感度係数の平均値 E' を求め、埋設法の測定位置にその値を示した。堅硬な岩盤である $C_H \sim B$ 級の岩盤中の E' は4.1~9.3GPaと高い値を示すのに対し、これよりも風化の進展した軟質な岩盤である $C_M \sim C_H$ 級の岩盤では1.6~3.8GPaの値を示し、 E' が測定地点の岩盤等級とよい対応を示していることがわかる。

堅硬な $C_H \sim B$ 級岩盤中では、ボアホールNo.1とNo.3の測定を行ったが、埋設ゲージのひずみ感度 E' をボアホール毎に平均すると、No.1では6.3GPa、No.3では5.0GPaと、No.1の方がより硬質な岩盤中で測定を行ったことがわかる。これに対し、 $C_M \sim C_H$ のやや軟質な岩盤中で測定を行ったボアホールNo.5では、 E' の平均が2.7GPaと低い値を示す。従って、ボアホール毎に見れば、No.1が最も硬質な岩盤中で、No.3がそれに次ぎ、No.5が最も軟質な岩盤中で測定を行ったといえる。そこで、各ボアホール毎の測定データを表5-1に示すように3種類組み合わせ、それぞれの組に対して応力状態を決定した。決定された主応力の大きさを、使用した埋設ゲージの感度 E' の平均値 $\overline{E'}$ とともに同表に示す。Case1~3の応力状態として平均直応力 $-(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ に着目すると、最も堅硬な岩盤中で測定を行ったボアホールNo.1のデータのみで決定した

表5-1. 解析ケースと初期地圧測定結果

Case and Symbol	Data (Bored hole number)	\bar{E}' (GPa)	Magnitude of principal stress (MPa)			
			$-\sigma_1$	$-\sigma_2$	$-\sigma_3$	$-(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$
1 ■	1	6.3	6.6	9.4	11.7	9.2
2 ▲	1, 3	5.8	5.5	7.3	9.9	7.5
3 ●	1, 3, 5	4.9	4.6	6.2	9.0	6.6

Data: Data used to determine the stress state. Bored hole numbers in which data were obtained are shown in the table.

\bar{E}' : Average of strain sensitivity coefficients of the hollow inclusion gauges used to determine the stress state.

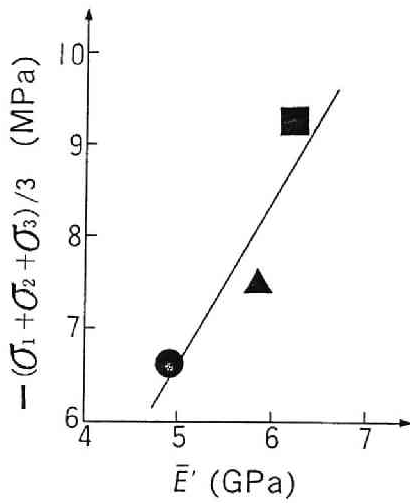


図5-12. 使用した埋設型ゲージのひずみ感度の平均値 \bar{E}' と平均直応力 $-(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ の関係

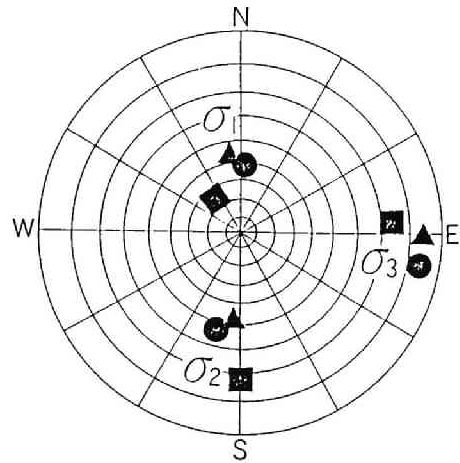


図5-13. 解析ケース毎の初期地圧の主応力方向(下半球ステレオ投影図)

Case 1の平均直応力は9.2 MPaの大きな値を示すのに対し、ボアホールNo. 3のデータを加えたCase 2では7.5 MPaとなる。さらに、軟質岩盤中のボアホールNo. 5のデータを加えると、Case 3に示すように平均直応力は6.6 MPaに低下する。

さて、平均直応力 $-(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$ を \bar{E}' と比較したのが図5-12である。この図より、 \bar{E}' と平均直応力の間には正の相関関係があることがわかる。一方、図5-13は、Case 1～3の主応力方向の下半球ステレオ投影図である。同図より、解析ケースが異なっても主応力方向はよく一致していることがわかる。以上のことから、当地点では、岩質により主応力方向はあまり変化しないが、圧縮応力の大きさはごく近接した岩盤中でも平均直応力で3 MPa程度の差が生じているといえる。

このような傾向が他地点でも見られるかどうかは興味をもたれるところである。そこで、比較的データの揃っている青函トンネル先進導坑と、四国地方のかぶり約70 mの花こう岩地点の測定データを検討してみた。

表5-2は、青函トンネル先進導坑で実施したAE法（測定法については第1章参照）による測定結果と、8素子ゲージを用いた孔底ひずみ応力解放法による測定結果を、測定地点の岩質別に整理したものである¹⁷⁾。測定地点の岩盤は凝灰岩であるが、横坑壁面やボーリングコアの観察結果から、岩質は風化作用をほとんど受けていない堅硬ち密な岩質と、風化の進展した比較的軟質な岩質の2種類に分類された。表中に示した応力値は水平N60°E方向の直応力成分であり、AE法によれば、硬質岩盤で -1.0 ± 3 MPa、軟質岩盤で -6 ± 3 MPa程度と推定され、その差は約4 MPaである。8素子ゲージを用いた応力解放法によれば、硬質岩盤では -8 ± 2 MPa、軟質岩盤では、 -4 ± 2 MPa程度とその差はやはり約4 MPaであり、岩盤剛性の違いによる岩盤内応力の大きさの違いは明らかである。なお、AE法と応力解放法の測定結果について、おのおの岩質別に比較すると、AE法による応力値の方が応力解放法による応力値より大きい。この傾向は他地点の測定結果にも見られ、両者の差は地点により異なるが、このような差を生じる原因のひとつは、AE法では地

表 5-2. 青函トンネル先進導坑における岩質別鉛直方向推定地圧

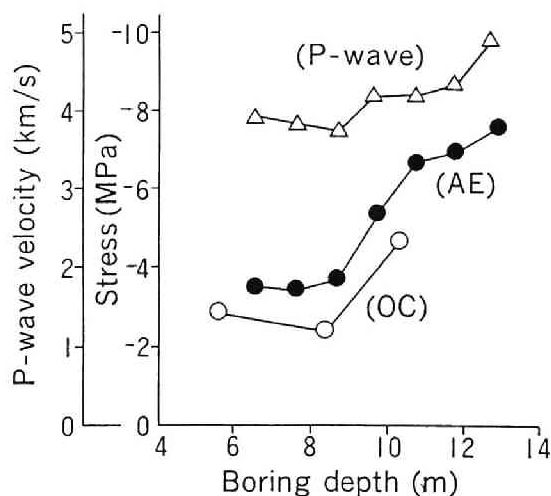
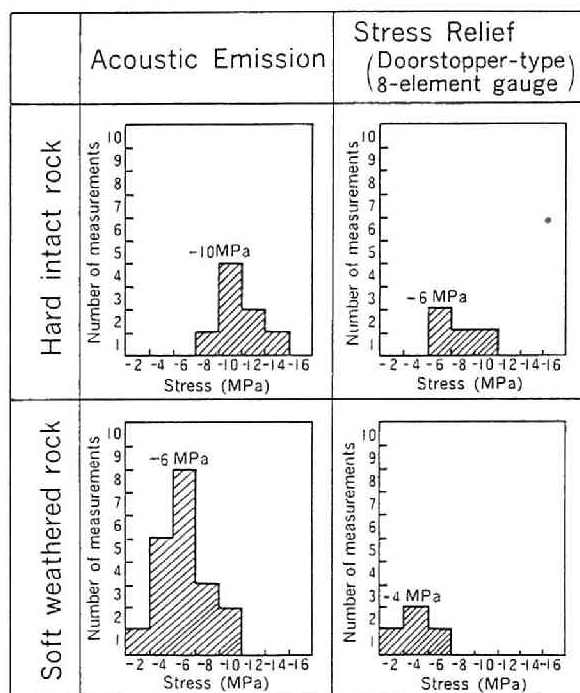


図 5-14. 花こう岩地点における岩盤の P 波速度、AE 法・応力解放法 (O, C.) による初期地圧の測定値とボーリング深度との関係

質年代的な長時間の応力履歴の最大値を検出しやすいのに対し、応力解放法では現存ひずみに対応した応力値を検出しやすい傾向によるものと思われる。

図5-14は、四国地方のかぶり約70mの花こう岩地点における測定例¹⁸⁾であり、横軸はボーリングの深度、縦軸はAE法、電力中央研究所式埋設型ゲージを用いた応力解放法により求められた岩盤内応力の測定値とボーリングコアのP波速度である。応力値は鉛直方向の直応力成分を示す。図5-14のP波速度の変化は岩質によるものと考えられ、P波速度が大きい、すなわち岩盤のヤング率が大きい程、岩盤内応力が大きい値になっており、その差はAE法で約4MPa、応力解放法で約2MPaである。

今回のA地下発電所と上に述べた2地点の結果から見る限り、不均質な岩盤内の応力の分布は様でなく、軟らかい岩盤よりも堅硬な岩盤でより大きな圧縮応力が生じている傾向が明らかである。またその差は概ね2~4MPaであった。岩盤内の初期地圧の分布は、空洞掘削時の山はねやゆるみ域の進展とも関連が深いと思われるので、今後、機会ある毎に測定データの詳細な分析を行い研究を進めていく必要があると思われる。

5.5 岩盤の粘弾性的性質¹⁾

地震波の伝播や通常のコアの圧縮試験などの短い時間における応力変化に対して、岩石は確かに弾性的挙動を示す。しかし、造山運動において岩石が破壊することなく著しいしゅう曲を起こし得ることも周知の事実である。初期地圧の測定結果に見られる大きな水平地圧が、このような岩盤の流動的な性質の影響を受けていることも考えられる。岩盤の粘弾性的性質が初期地圧状態に及ぼす影響については、岩盤を Burgers 体と仮定した鈴木らの研究¹⁹⁾が報告されている。ここでは簡単のため Maxwell 体を用いて岩盤の粘弾性的挙動について考察することとする。

岩盤が、偏差応力成分 S_{ij} と偏差ひずみ成分 e_{ij} に対しては Maxwell 体で表される粘弾性体としてふるまい、平均応力 σ_{ii} と平均ひずみ ε_{ii} に対しては弾性的に挙動する物体であると仮定すると、応力とひずみの関係は次式のよう

に表される。

$$d(S_{ij})/dt + G \cdot S_{ij} / \eta = 2G \cdot d(e_{ij})/dt \quad (5-2)$$

$$\sigma_{ii} = 3K \epsilon_{ii} \quad (5-3)$$

ここに、GおよびKはそれぞれ弾性体の剛性率と体積弾性率に相当する定数で、 η は粘性定数である。

いま、粘弾性岩盤内で鉛直方向の直応力 σ_z が次のように与えられたとき、それによって生じる水平方向の応力成分 σ_H を計算する。

$$\sigma_z = P_0 \cdot \{1 - \exp(-t/\tau)\} \quad (\tau \text{は任意の定数}) \quad (5-4)$$

$$P_0 = -\rho g h \quad (5-5)$$

これに対応する弾性解が、自重のみが作用する弾性岩盤が水平方向に伸び縮みできない場合に生じる水平地圧 σ_H が $\rho g h \nu / (1 - \nu)$ で与えられるものとすれば、線形粘弾性解と弾性解の対応原理により、 σ_H は σ_z によって次式のように表される。

$$\sigma_H(s) = \{\nu^*/(1 - \nu^*)\} \sigma_z(s) \quad (5-6)$$

ただし、*は時刻 t を含む変数に施したラプラス変換を意味する。さて、(5-6)式の係数項は次式のようにになる。

$$\nu^*/(1 - \nu^*) = 1 - 6G\eta s / \{(3K + 4G)\eta s + 3KG\} \quad (5-7)$$

(5-7)式を(5-6)式に代入し、その結果にラプラス逆変換を施せば、求める解 σ_H が得られる。

$$\sigma_H/P_0 = 1 + \{6G/(C - 3K\tau/\tau_M)\} \{ \exp(-t/\tau) - \exp(-3Kt/C\tau_M) \} \quad (5-8)$$

ここに、 $C = 3K + 4G$ 、また τ_M はMaxwell体の緩和時間で $\tau_M = \eta/G$ である。なお、(5-4)式と(5-8)式から、

$$\eta \rightarrow \infty \text{ のとき } \sigma_H/\sigma_z = 1 - 6G/C = \nu/(1 - \nu) \quad (5-9)$$

となり、弾性体の場合の解と一致する。

Maxwell体は、応力が τ_M より十分短い時間に作用すれば弾性的に、 τ_M より十分長い時間にわたって作用すれば粘性的に挙動する。このような観点から現実の岩盤の τ_M の値には興味がある。伊藤らは、19年に及ぶ花こう岩の²¹⁾²²⁾

クリープ試験や西南日本の第四紀地殻変動から、岩盤や地殻を Maxwell 体で表現した場合、その粘性定数 η は約 10^{15} MPa \cdot s であるとしている。また、剛性率 G の値は、地殻上層の地震波動や実験室での岩石の剛性率から、 10^4 MPa 程度としているが、この値は山砂の採取に伴う付近の水準点の隆起量から求めたヤング率²³⁾とよい一致を示しており、オーダ的に十分信頼できるものと思われる。これらの値から τ_M を求めると、

$$\tau_M = \eta / G = 10^{11} \text{ s} \approx 3000 \text{ 年} \quad \text{----- (5-10)}$$

が得られる。応力の作用時間をどの程度と考えるかは難しい問題である。しかし、例えば、筆者らの測定点が数多く分布する西南日本内帯の地殻変動が、南北圧縮の傾向から現在の東西圧縮の傾向に変わってから、すでに100万年～200万年近く経過していることを考えれば、²¹⁾3000年という時間は決して長い時間ではない。従って、岩盤の粘弾性的挙動が初期地圧状態に影響を及ぼす可能性は十分考えられる。そこで、次にその影響の程度を検討してみる。

(5-4) 式と (5-8) 式から、 $t \rightarrow 0$ 、 $t \rightarrow \infty$ における σ_H / σ_z の値を求めると、

$$t \rightarrow 0 \text{ のとき } \sigma_H / \sigma_z = \nu / (1 - \nu) \quad \text{----- (5-11)}$$

$$t \rightarrow \infty \text{ のとき } \sigma_H / \sigma_z = 1 \quad \text{----- (5-12)}$$

となる。また、一例として、

$$G = 10^4 \text{ MPa}$$

$$K = 2 \times 10^4 \text{ MPa}$$

$$\eta = 10^{15} \text{ MPa} \cdot \text{s}$$

$$\tau = 3 \times 10^{13} \text{ s} = 100 \text{ 万年}$$

と仮定した場合の、 σ_H / σ_z と t の関係を図5-15に示す。この場合、 $K = 2G$ の関係より $\nu / (1 - \nu) = 0.4$ である。(5-11)、(5-12)式と図5-15より明らかなように、 $0 < t < \infty$ の t に対して、

$$\nu / (1 - \nu) \leq \sigma_H / \sigma_z \leq 1 \quad \text{----- (5-13)}$$

である。このことは、岩盤の粘弾性的挙動を考慮すれば弾性論的な考察から予想される状態より水平地圧は大きくなるが、それは最大でも $\sigma_H / \sigma_z = 1$ の

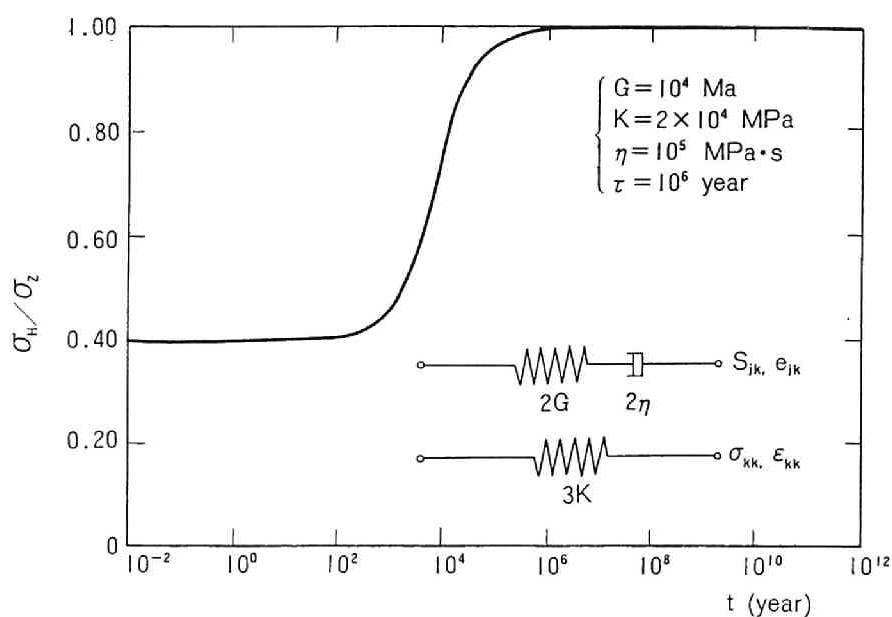


図5-15. σ_H/σ_z の時間変化と応力-ひずみ関係のモデル

静水圧状態までで、 $\sigma_H/\sigma_z > 1$ の状態は決して生じえないことを示している。しかし測定結果における水平方向の最大地圧 σ_{Hmin} の大きさが σ_z のそれより小さいことはむしろまれであり、初期地圧は多くの場合 $\sigma_{Hmin}/\sigma_z > 1$ の状態にある。また、岩盤の粘弾性的挙動で生じる水平地圧は等方的であるが、測定結果において $\sigma_{Hmin} \approx \sigma_{Hmax}$ であることは少ない。以上のことから、岩盤の粘弾性的性質は、 σ_{Hmin} の発生原因の一つではあるかもしれないが、その主要なものとは考えられない。

5.6 残留応力

残留応力とは、岩盤の外表面から応力が伝達されないとき、その岩盤内部で釣り合っている、あるいは釣り合い状態に移行しつつある応力場の系として定義される。²⁴⁾ ²⁵⁾ 小出は次のような例をあげて残留応力を説明している。図5-16に示すように、硬くて変形しにくい材料Cと軟質の材料Wが隣接していたとする。単純にするため、極めて剛性の高い材料Rではさまれ、完全に接着されていたとする。上下から全体を圧縮し変形させると、CとWの内部応力は異なる

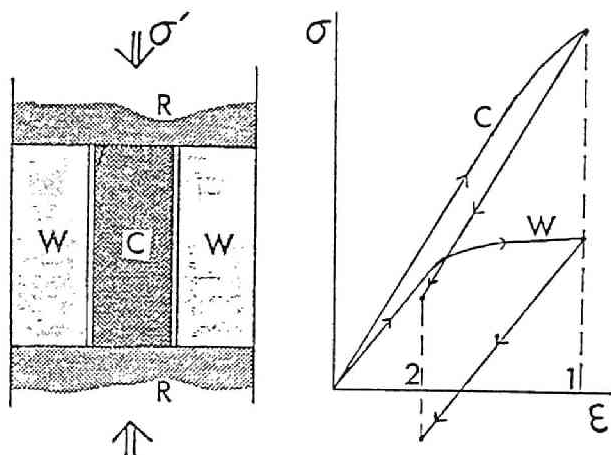


図5-16 残留応力の説明図。²⁵⁾ C：コンプライアントな材料，
W：軟延性材料， R：剛体， σ' ：外力，
 σ ：応力， ϵ ：ひずみ。

が、共に弾性変形をしている限り外力を取り除けばひずみは零に戻る。ところがWが降伏する状態1まで変形させると、ひずみは零に戻ることができなくなる。Wに永久ひずみが生じるために、ある程度までひずみが戻るとWの内部に引張応力が発生し、Cの内部の圧縮応力と釣り合う状態2で停止する。外力が零になってもひずみが残るので、ひずみ2を残留ひずみと呼び、CとWの内部に残っている応力を残留応力と呼ぶ。

氷河時代に分厚い氷河が堆積したカナダやスカンジナビア半島では、岩盤内に大きな水平圧縮応力が存在し地下空洞の安定に悪影響を及ぼすことがあり、これらは残留応力によるものと言われている。²⁶⁾しかし、初期地圧の測定値から、残留応力を区別することはかなり困難である。一度オーバーコアリングして応力解放したコアにまたもっと小さい径でオーバーコアリングして、その差から残留応力を求めるダブルオーバーコアリングという方法がある。²⁷⁾しかし、この方法で求められる残留応力は、たかだか十数cm程度の大きさの岩石中に残留している応力であって、より大きい岩石中あるいは小さい岩石中の残留応力は求められない。²⁵⁾

以上のことから、残留応力が初期地圧状態に及ぼす影響は無視できないものの、現状では岩盤中での実際の作用機構と影響の度合いが明確ではなく、その定量的評価は今後の研究課題として残されている。

5. 7. 初期地圧状態の予測法の提案

本章では、初期地圧評価のための要因の選定を目的として、造構応力、地形、岩盤の不均質性、岩盤の粘弾性的性質及び残留応力が初期地圧状態に及ぼす影響を検討してきたが、これらの要因のうち、その影響が大きく、またある程度地圧状態が推定できるものは、その地域の造構応力状態、測定地点の地形及びかぶり深さの3つであると考えられる。そこで、ここでは影響要因をこの3つにしぼり、初期地圧状態を予測するための方法を提案する。以下にその内容を図5-17の流れ図に沿って説明する。

(1) 最小主応力(3次元的な最大地圧) σ_3 は水平に近い方向から作用するか、鉛直に近い方向から作用するか？

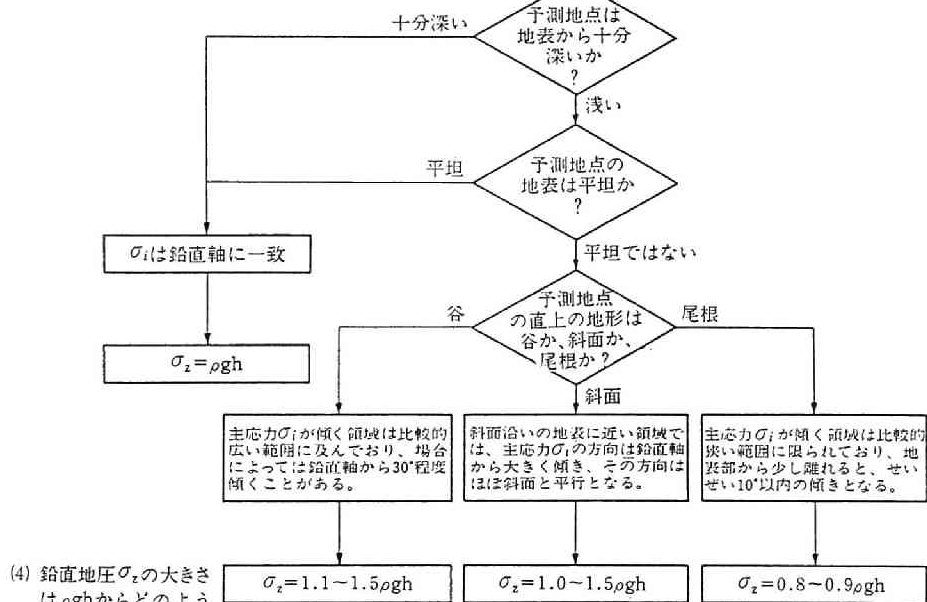
初期地圧の測定を実際に行うと、最小主応力 σ_3 の方向が水平に近い方向にあることが少なくない。このような場合、その方向はその地域に作用している造構応力の方向と概ね一致していることが多い。従って、その地域に造構応力が作用している兆候が明らかに存在する場合、初期地圧の最小主応力の方向は造構応力の方向にあると予測することができよう。

さて、造構応力の作用の有無とその方向はどのようにして調べればよいであろうか。平松らは、造構³⁾応力を推定する方法として、(i) 岩盤中に発達している裂かや断層などから推定する方法、(ii) 地震波のうち縦波(P波)の初動の押し引きの分布から推定する方法、(iii) 一等三角点測量から求められた地殻のひずみから推定する方法の3つを提案している。しかし、このほかに活しゅう曲や岩脈の貫入状態なども、造構応力の推定に用いることができるものと思われる。また、問題としている地点の付近で、初期地圧状態の実測がされたことがあるならば、その結果もその地域の造構応力状態を推定するための重要なデータとなるのはもちろんである。なお、日本列島、特に西南日本の造構

(1) 最小主応力（最大地圧） σ_3 は水平に近い方向から作用するか、鉛直に近い方向から作用するか？

(2) 中間主応力 σ_2 と最大主応力（最小地圧） σ_1 は、水平に近い方向から作用するか、鉛直に近い方向から作用するか？

(3) 鉛直に近い方向から作用する任意の主応力 σ_i の作用方向は、鉛直軸からどの位傾くか？（図5-7参照のこと）



(4) 鉛直地圧 σ_z の大きさは ρgh からどのように見られるか。

（図5-8参照のこと）

（ ρ ：岩盤の密度、 g ：重力加速度、 h ：地表からのかぶり深さ）

図5-17. 初期地圧状態の予測法

応力状態は、100万～200万年前のある時期を境にしてその前後で大きく変化したと考えられており、岩盤中の裂かや断層あるいは岩脈の貫入状態から²¹⁾造構応力を推定しようとする場合、それらが現在の応力場で形成されたものであることを確認しておく必要がある。さて、上記のいくつかの方法を用いて検討した結果、いずれの結果からも一致してその地域に一定の方向の造構応力の存在が推定されるならば初期地圧の最小主応力 σ_3 は造構応力の方向に作用している可能性が高いとしてよい。もし、そのような造構応力の作用の徴候が見られない場合、最小主応力 σ_3 は上方に存在する岩盤の自重により生じていると考え、その作用方向は鉛直に近い方向としてよい。

(2) 中間主応力 σ_2 と最大主応力 σ_1 は、水平に近い方向から作用するか、鉛直に近い方向から作用するか？

地下岩盤内に作用する荷重は地殻構造の形成に関連した荷重と上方に存在する岩盤の自重が主要なものであると考えられるので、造構応力が存在し σ_3 の方向が水平である場合には、中間主応力 σ_2 は岩盤の自重により生じてほぼ鉛直方向から、最大主応力 σ_1 は σ_3 と直交する水平方向から作用すると考える。また、逆に、造構応力が存在せず最小主応力 σ_3 が鉛直方向から作用している場合には、 σ_2 、 σ_1 の方向はいずれも水平にあると考える。電力中央研究所の埋設型ゲージによる実測結果²⁸⁾を見ると、水平方向の最大地圧 σ_{Hmin} と鉛直地圧 σ_z の比 σ_{Hmin}/σ_z が1.3以上の水平圧の大きな地点では、ほとんどの場合最小主応力（最大地圧） σ_3 の作用方向が水平から30°以内にあり、一方 σ_2 のそれは鉛直軸から50°以内の範囲にある。また逆に、 $\sigma_{Hmin}/\sigma_z < 1.0$ と水平地圧が鉛直地圧に比べて小さい場合には、 σ_3 の作用方向は例外なく鉛直から45°以内にあり、 σ_2 、 σ_1 のそれらは水平から40°以内にある。このような傾向は、すでに述べた孔底ひずみ測定法による結果にも見られ、上述の考え方が基本的に正しいことがわかる。

(3) 鉛直に近い方向から作用する任意の主応力 σ_i の作用方向は、鉛直軸からどの位傾くか？

鉛直方向から作用する地圧は主に上方に存在する岩盤の自重により生じるも

のと思われるから、測定地点の地表が平坦であれば、鉛直方向から作用する主応力の方向は鉛直軸に一致するものと考えてよい。しかし、尾根、斜面、谷などの直下では、これらの地形の影響を受け、主応力の方向は鉛直軸から傾くものと思われる。5.3節では、岩盤自重のみが作用する傾斜地において、初期地圧の最大地圧の方向が鉛直軸からどの程度傾くかを有限要素法解析により検討した。(図5-7参照)。その結果を参照して次のように予想する。(i) 谷地形の直下では、主応力が傾く領域は比較的広い範囲に及んでおり、場合によっては鉛直軸から30°程度傾くことがある。(ii) 斜面直下、すなわち斜面沿いの地表に近い領域では、主応力の方向は鉛直軸から大きく傾き、その方向はほぼ斜面と平行となる。(iii) 尾根地形の場合、主応力が傾く領域は比較的狭い範囲に限られており、地表部から少し離れると、せいぜい10°以内の傾きとなる。なお、地形のために主応力の方向が5°以上傾く領域は比較的地表近いところに限られ、地表からある程度離れた深いところでは主応力方向はほぼ鉛直軸に一致する。

(4) 鉛直地圧(鉛直方向の直応力成分) σ_z の大きさは、 $\rho g h$ からどのように見積もれるか?

地表が平坦な場合には、鉛直地圧 σ_z は $\rho g h$ (ρ , g , h はそれぞれ岩盤の密度、重力の加速度、かぶり深さ)で見積もることができる。しかし、地表が平坦でない場合、 σ_z は $\rho g h$ と異なる大きさとなり、特に急峻な山岳地帯などでは σ_z が $\rho g h$ と大きく異なる場合がある。(図5-8参照)。すなわち、(i) 谷地形直下では、 σ_z の大きさは $\rho g h$ の1.1倍から場合によっては1.5倍の値となるため、単純に $\rho g h$ で σ_z を見積もると σ_z を過小評価することになる。(ii) 斜面直下のある程度かぶりのあるところでも、 σ_z は $\rho g h$ の約1.5倍の値となることがある。しかし深くなるにつれて σ_z は $\rho g h$ の値に近づく。(iii) 地表が尾根の場合は、 σ_z の値は $\rho g h$ の0.8倍から0.9倍と、 $\rho g h$ より小さな値となる。なお、以上は比較的地表に近い領域での傾向であり、表面が傾斜していてもある程度以上のかぶり深さがあれば、地表の平均高さからの距離 h' を用いて σ_z を $\rho g h'$ で見積もること

ができる。

以上、初期地圧状態に影響を及ぼす要因は、その地域の造構応力状態、測定地点の地形及びかぶり深さの3つであると仮定し、初期地圧状態を予測するための方法を提案した。しかし、初期地圧に影響を及ぼす要因は上記以外に岩盤の不均質性や粘弾性的性質、残留応力など種々のものが考えられ、それらがどの程度初期地圧状態に影響を及ぼすかはまだ十分に明らかにされていない。従って、上に示した初期地圧状態の予測法はあくまでひとつの試案であり、現状では初期地圧状態を適切に予測しえない地点も少なくないものと思われる。

実測することなく初期地圧状態が予測できることの有用性はすでに述べた通りである。今後、初期地圧状態の予測法をより適切なものに改良していくためには、初期地圧状態に影響を及ぼす諸要因に関する定量的評価の研究を進めることが重要である。それとともに、ここで述べた手順で初期地圧状態を予測し、同時に実測も行なって比較し、両者に差があればそれは何に起因しているかを検討することを積み重ねていくことも必要である。また、地下岩盤内の様々な現象がどのように発生し、相互にどのような影響を及ぼし合っているかが、明らかになされていくなれば、ここで取り扱った初期地圧の予測法もより確実なものになると思われる。

5. 8. 結言

本章では、初期地圧評価のための要因の選定を目的として、まず初期地圧状態に影響を及ぼす諸要因について検討を行った。すなわち、初期地圧測定結果を、種々の方法から推定される造構応力の作用方向と比較した。単純な地形モデルの弾性解析を行って地形の影響を理論的に検討した。また、岩盤の不均質性が初期地圧状態に及ぼす影響を検討するため、3地点における初期地圧の実測データを詳細に分析した。岩盤の粘弾性的性質の影響を調べるため、岩盤を Maxwell 体と仮定し、地球物理学の分野の研究成果を参考にして検討を行った。残留応力については、主に文献を参照してその考え方を整理した。そして

これらの結果に基づき、初期地圧状態に影響を及ぼす要因を、その地域の造構応力状態、測定地点の地形及びかぶり深さの3つであると仮定し、初期地圧状態の予測法を提案した。これらをまとめると、以下の通りである。

(1) 初期地圧測定結果の水平方向の最大地圧の方向を、一等三角点の再測量から求められた定常的な水平地殻ひずみの方向や、第四紀に活動的となった構造帯の分布から推定される造構応力の作用方向と比較したところ、これらと傾向的によい一致を示すことがわかった。従って、初期地圧の水平成分は、造構応力あるいは地殻応力と呼ばれる、プレートテクトニクスに基づく地殻構造の形成に関する力に深く関連していることが予想される。また、このような力の存在は、初期地圧状態の地域的な違いを特徴づける大きな要因と考えられる。

(2) 岩盤自重のみが作用する傾斜地において、初期地圧の最小主応力(最大地圧)が鉛直軸からどの程度傾くかを検討した。その結果次のことがわかった。

(i) 主応力の大きな傾きは、斜面に近い領域に限られており、深い位置ではほとんど傾いていない。(ii) 斜面のすぐ下、すなわち、地表に近いところでは、主応力の方向が斜面と平行となっている。(iii) 谷地形を表す部分では、主応力の傾く領域が広い範囲に及んでいる。

(3) 初期地圧の鉛直方向の直応力成分 σ_z をかぶり圧 $\rho g h$ (ρ , g , h はそれぞれ岩盤の密度、重力の加速度、かぶり深さ)で見積もる場合、尾根地形直下では実際の σ_z が見積もり値より小さい値となるが、谷地形直下では逆に σ_z が見積もり値より大きくなるため注意を要する。また急峻な山岳地帯などの地下では、 $\sigma_z \approx \rho g h$ となる範囲が非常に狭い領域に限られてしまうため、 σ_z を単純に $\rho g h$ で予測することはできない。しかし、地表面が傾斜していても、一定以上のかぶり深さがあれば、地表の平均高さからの距離 h' を用いて $\rho g h'$ で σ_z を見積もることができる。

(4) 不均質な岩盤中の初期地圧の分布は一樣ではなく、軟らかい岩盤よりも硬い岩盤の方がより大きな圧縮応力が生じている傾向がある。また、その差は、今回の検討の範囲では概ね2~4 MPa程度であった。

(5) 岩盤の粘弾性的性質は初期地圧状態に十分影響を与えるものと思われ、

その影響を考慮すれば、弾性論的な考察から予想される状態より水平地圧 σ_H の大きさは大きくなることがわかった。しかし、それは鉛直地圧 σ_z と比較して最大でも $\sigma_H/\sigma_z = 1$ の静水圧状態までであり、測定結果に見られる $\sigma_H/\sigma_z > 1$ の状態はけっして生じない。また、岩盤の粘弾性的挙動で生じる水平地圧は等方的であるが、測定結果においては等方的な水平地圧の場合は少ない。これらのことから、岩盤の粘弾性的性質は初期地圧状態を静水圧状態に近付ける要因ではあるが、大きな水平地圧を発生させる原因とは考えられない。

(6) 初期地圧状態に影響を及ぼす要因を、その地域の造構応力状態、測定地点の地形及びかぶり深さの3つであると仮定し、初期地圧状態の予測法を提案した。しかし、これはあくまでひとつの試案であり、今後より適切なものに改良していくためには、岩盤の不均質性や粘弾性的性質、残留応力など初期地圧状態に影響を及ぼす種々の要因に関する定量的評価の研究が重要と思われる。

参考文献

- 1) 斎藤敏明, 石田毅, 寺田孚, 田中豊: 実測結果に基づくわが国の地下岩盤内の初期地圧状態の検討, 土木学会論文集, 394号/Ⅲ-9, pp. 71-78 (1988)
- 2) Anderson, E.M.: The Dynamics of Faulting and Dyke Formation with Applications to Britain, Second Edition Revised, Oliver & Boyd, Edinburgh, p.144 (1951)
- 3) 平松良雄, 岡行俊, 伊藤英文, 田中豊: 岩盤内の地山応力と地学的に推定される地殻応力との関連について, 材料, 23巻, 248号, pp. 87-93 (1974)

- 4) Haimson, B.C.: Near-surface and deep hydrofracturing stress measurements in the Waterloo quartzite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.17, No.2, pp.81-88 (1980)
- 5) Tanaka, Y. and Oka, Y.: Generation mechanism of rock bursts and water-induced earthquakes under the tectonic stress field, *Rock Mechanics in Japan*, Vol.Ⅲ, pp.71-73 (1978)
- 6) 藤田和夫: 中部 近畿北部の第四紀テクトニクスと造構応力場, 月刊地球, 2巻, 8号, pp. 586-595 (1980)
- 7) 杉村新: 日本付近におけるプレートの境界, 科学, 42巻, 4号, pp. 192-202 (1972)
- 8) 原田健久, 葛西篤男: 最近60年間における日本の地殻水平歪, 測地学会誌, 17巻, pp. 4-7 (1971)
- 9) 中根勝見: 日本における定常的な水平地殻歪(Ⅰ), 測地学会誌, 19巻, pp. 190-199 (1973)
- 10) 中根勝見: 日本における定常的な水平地殻歪(Ⅱ), 測地学会誌, 19巻, pp. 200-208 (1973)
- 11) 平松良雄, 岡行俊: 地形が地圧に及ぼす影響の実験的研究, 水曜会誌, 15巻, 2号, pp. 57-60 (1963)
- 12) McTigue, D.F. and Mei, C.C.: Gravity-induced stresses near topography of small slope, *J. Geophys. Res.*, Vol.86(B10), pp.9268-9278 (1981)
- 13) Savage, W.Z., Swolfs, H.S. and Powers, P.S.: Gravitational stresses in long symmetric ridges and valleys, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.22, No.5, pp.291-302 (1985)
- 14) 石田毅, 金川忠: 地殻応力測定結果にみられる岩盤の不均質性の影響, 地震2, 40巻, pp. 329-339 (1987)
- 15) 日本応用地質学会: 岩盤分類(応用地質特別号), pp. 155-156 (1984)
- 16) 金川忠, 林正夫, 北原義浩: 地圧の計測法と応用, 電力土木, 163号, pp. 31-42 (1979)
- 17) 金川忠, 林正夫, 仲佐博裕: 岩石における地圧成分のAcoustic Emissionによる推定の試み, 土木学会論文報告集, 258号, pp. 63-75 (1977)

- 18) Kanagawa, T., Komada, H. and Hayashi, M.: Measurements of tectonic stresses, strain rate related to active faults and observed earthquakes around large cavern, Proc. of 5th International Congress on Rock Mechanics, Melbourne, Australia (1983)
- 19) 鈴木光, 西松裕一, 石島洋二: 一次地圧の測定値とその粘弾性論的考察 (第1報) 日本鉱業会誌, 83巻, 950号, pp. 793-799 (1967)
- 20) Lee, E.H.: Stress analysis in Visco-Elastic Bodies, Quarterly of Applied Mathematics, Vol.13, No.2, pp.183-190 (1955)
- 21) 伊藤英文, 藤田和夫: 西南日本の第四紀地殻変動から導かれた地殻の流動, 材料, 20巻, 209号, pp. 190-196 (1971)
- 22) 伊藤英文, 岡行俊, 藤田和夫: 縮みゆく日本列島, 科学, 46巻, 12号, pp. 745-754 (1976)
- 23) 多田亮: 山を削ると隆起する, 地震2, 35巻, 3号, pp. 427-434 (1982)
- 24) Voight, B.: Restspannugen im Gestein, Proc. of 1st International Congress on Rock Mechanics, Lisbon, Portugal, Vol.2, pp.45-50 (1966)
- 25) 小出仁: 地震予知のための応力測定の問題点, 月刊地球, 2巻, 8号, pp. 578-585 (1980)
- 26) 堀正幸: カナダ オンタリオ州における岩盤内応力測定, 土木学会誌, 1978年6月号, pp. 66-71
- 27) Greiner, G. and Illies, J.H.: Central Europe: Active or residual tectonic stresses, Pure and Applied Geophysics, Vol.115, pp.11-26 (1977)
- 28) Kanagawa, T., Hibino, S., Ishida, T., Hayashi, M. and Kitahara, Y.: In situ stress measurements in the Japanese Islands: Over-coring results from a multi-element gauge used at 23 sites, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.23, pp.29-39 (1986)

第6章 結論

古くから地下岩盤内には種々の空洞が掘削されてきたが、最近ではその目的も多様化し、地下空間の有効利用に対する社会的必要性はますます増大している。地下空洞、特に大規模な地下空洞の安定には、空洞掘削前の岩盤内の応力状態、すなわち初期地圧状態が極めて大きな影響を与える。従って、初期地圧状態の一般的傾向を明らかにし、その状態を正しく評価することは、地下資源開発や地下空間の有効利用のために基本的かつ重要な研究と思われる。筆者は、地下水力発電所や長大トンネル空洞の設計、鉱山や炭鉱における採鉱 採炭設計、さらには地震予知を目的とした地殻の応力状態の調査などに関連して、日本各地で初期地圧状態の測定を行う機会を得た。本論文では、これらの測定結果を利用して、初期地圧状態を正しく評価するための種々の検討を行った。得られた成果をまとめると次のようである。

(1) 初期地圧状態については諸説があり、定まった見解は未だ確立されていない。従って、初期地圧状態の一般的傾向を明らかにし、初期地圧状態を支配する要因を把握するためには、数多くの信頼できる測定精度の高い初期地圧測定の結果を収集し、多面的に検討する必要がある。初期地圧測定法には種々のものがあるが、現状では応力解放法が最も精度の高い方法と思われるので、この方法を用いて我が国の初期地圧状態の調査を行うのが適当と考えた。また地下深部の高い地圧場では、ボーリング孔の孔壁やコアの破壊のために、従来の初期地圧測定法を用いることができない。従って、このような場所の初期地圧状態を推定できる新たな方法の開発が必要と考えた。

(2) 高い地圧場における初期地圧状態の推定法として、中空コアの破壊現象に注目した。高い地圧が作用している岩盤中にコアボーリングを行うと、コアがボーリング軸と直角に規則正しく平板状に割れる、いわゆる、コアディスクキング現象に遭遇することがある。このコアディスクキング現象は、初期地圧測定のオーバーコアリングの際に得られるような中空コアに対しても発生する。この破壊現象は地圧状態と密接に関連しており、また中空コアの場合には先進ボーリングの口径や中空コアの肉厚を変化させることにより破壊の発生を制御で

きるから、初期地圧の推定に特に有用と思われる。そこで、この破壊現象がどのような地圧状態で発生するのかを詳細に解析し、またその結果を実際に現場で発生した中空コアの破壊現象と比較してその適用性を検討した。その結果、中空コアの破壊現象が高い地圧場における初期地圧推定法として有用であることがわかった。

(3) 筆者が実際の測定に深く関与した初期地圧測定結果のうち、我が国で最も地下深い箇所での測定である佐々連鉱山の例や1本のトンネル沿いに谷、斜面および尾根地形の直下で測定を行った関越トンネルの例など特徴的な5箇所の結果を選び、測定地点毎に詳細に考察した。これらの測定の目的は、地下発電所や長大トンネル空洞の設計や、地震予知に関連した地殻の応力状態の調査など多岐にわたるが、測定結果はいずれもそれぞれの測定目的に有用な情報を提供している。また、測定結果は測定地点毎に特徴を有し、多くの場合初期地圧状態は測定地点の地形や地質構造、その地域の地殻構造の形成に関連する力などと符号していることがわかった。

(4) 上述の測定結果に、応力解放法を用いて日本各地で行われた信頼性の高い初期地圧測定結果を加え、これらのデータに基づいて、我が国における初期地圧状態の一般的傾向を調べた。その結果、鉛直地圧は地表からの深さに対応するかぶり圧にほぼ等しいが、水平地圧は等方的に作用しないことが多く、水平方向の最大地圧は一般に鉛直地圧よりも大きいことが明らかとなった。

(5) 初期地圧評価のための要因の選定を目的として、造構応力、地形、岩盤の不均質性、岩盤の粘弾性的性質、残留応力が初期地圧状態に及ぼす影響を検討した。その結果、初期地圧状態は造構応力の影響をかなり強く受けており、水平方向の最大地圧の方向は、一等三角点の再測量から求めた水平地殻ひずみの方向や、第四紀に活動的となった構造帯の分布から推定された造構応力の方向と、傾向的によく一致していることがわかった。そこで、ひとつの試みとして、初期地圧に影響を及ぼす要因はその地域の造構応力状態、測定地点の地形及びかぶり深さの3つであるとして、初期地圧状態の予測法の提案を行った。

初期地圧状態は地下の岩盤が置かれている状態を示すひとつの重要な指標で

あるとともに、岩盤中で生じている様々な現象の影響をも受けている。今後、さらに初期地圧状態に影響を及ぼす種々の要因に関する研究を精力的に進めることによって、地下岩盤内でどのような現象が発生し、相互にそれらがどのような影響を及ぼし合っているかが、徐々に明らかになされていくものと思われる。

謝 辞

終わりに、本研究を行うにあたり、終始かわらぬ御懇篤な御指導と多くの御示唆を賜った京都大学工学部教授 寺田孚博士、同助教授 斎藤敏明博士に深く感謝するとともに、有益な助言と御協力をいただいた（財）電力中央研究所 金川忠主任研究員に厚く御礼申し上げます。また、実験や数値解析などに御協力いただいた京都大学工学部資源工学教室の卒業生の方々、並びに、有益な助言をいただいた京都大学理学部 田中豊講師をはじめとする地球物理学教室の皆様、さらに、現場実験に御協力頂いた関係各社の皆様に深甚なる謝意を表する次第であります。

